

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada:

Doc. dr. sc Daniel R. Schneider

Bruno Bogdan

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Bruno Bogdan

Zagreb, 2010.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske
ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite
studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski
i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Bruno Bogdan**

Mat. br.: 0035152956

Naslov: **Energetska uporaba komunalnog otpada postupkom rasplinjavanja**

Opis zadatka:

Termička obrada otpada može predstavljati samo posljednju stepenicu u integriranom sustavu gospodarenja otpadom. Odvojeno skupljanje i primarna selekcija s odvajanjem vrijednih materijala koji se mogu iskoristiti u svrhu ponovne uporabe ili reciklaže mora prethoditi svim ostalim postupcima. Kod održivog sustava gospodarenja komunalnim otpadom, energetska uporaba komunalnog otpada primijenit će se u onom segmentu u kojemu je odlaganje otpada nezaobilazno. Budući da nove tehnologije termičke obrade otpada poput rasplinjavanja i pirolize pružaju potencijal za veću iskoristivost energije iz otpada kao i smanjenje emisija onečišćujućih tvari od tradicionalnih tehnologija poput izgaranja na rešetki u radu je potrebno analizirati tehnologiju rasplinjavanja komunalnog otpada s proizvodnjom energije s aspekata energetske učinkovitosti, zaštite okoliša te ekonomskih troškova.

U radu je potrebno:

- Napraviti pregled različitih tehnologija rasplinjavanja komunalnog otpada kao načina termičkog zbrinjavanja komunalnog otpada;
- Izabrati jednu od tehnologija rasplinjavanja, te za odabrani slučaj napraviti tehno-ekonomski proračun postrojenja s odgovarajućom tehnologijom (rasplinjačem i opremom za čišćenje proizvedenih gorivih plinova) i plinskim motorom kao generatorom električne energije;
- Napraviti usporedbu korištenja plinskog motora i plinske turbine za navedeni slučaj.

Zadatak zadan:

20.10.2009.

Predviđeni datum obrane:

listopad 2010.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr.sc. Daniel Rolph Schneider

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

Sažetak rada

U radu se analizira proces rasplinjavanja kao jedna od mogućih tehnologija za termičku obradu komunalnog otpada s ciljem njegove energetske oporabe. Budući da termička obrada otpada predstavlja samo posljednju stepenicu u integriranom sustavu gospodarenja otpadom, ukratko su opisani načini zbrinjavanja i klasifikacije otpada, a detaljnije tehnologije termičke obrade komunalnog otpada.

Budući da je rasplinjavanje novija tehnologija termičke obrade otpada koja ima potencijal veće iskoristivost energije i smanjenja emisija onečišćujućih tvari od tradicionalnih tehnologija, u radu su analizirana najnovija svjetska iskustva u razvoju tehnologije rasplinjavanja u pogledu energetske učinkovitosti, zaštite okoliša i ekonomskih troškova. Detaljno su opisani sustavi za rasplinjavanje komunalnog otpada, sustavi za pročišćavanje sintetskog plina, kao i postrojenja za transformaciju toplinske energije otpada u električnu energiju: plinski motor, parno i kombinirano postrojenje.

Jedan od zadataka u radu je bio izrada tehno-ekonomske analize isplativosti postrojenja za energetske oporabu komunalnog otpada rasplinjavanjem koje koristi plinski motor za proizvodnju električne energije. Kao predložak za analizu korišteno je realno postrojenje u mjestu Greve in Chianti, blizu Firence u Italiji. Uz prilagodbu ulaznih parametara potrebama diplomskog zadatka, dobiven je specifični trošak zbrinjavanja otpada u iznosu 44,85 €/t. Budući da su raspoloživi ulazni parametri dijelom nedovoljno pouzdani, napravljena je analiza osjetljivosti na ulazne parametre, kako bi procjena projekta bila što elastičnija.

Na kraju je napravljena usporedba analiziranog postrojenja s modernijim postrojenjem koje koristi kombinirani ciklus za proizvodnju električne energije. Kombinirano postrojenje se pokazalo isplativijim sa specifičnim troškom zbrinjavanja otpada od 38,62 €/t. Međutim, oba proračuna su izrađena na temelju pretpostavki koje bitno određuju dobivene rezultate. U slučaju kombiniranog postrojenja zahtjeva se najviši stupanj pročišćavanja sintetskog plina koji još uvijek nije u potpunosti dostignut, tako da se točna raspoloživost i pouzdanost kombiniranog postrojenja ne mogu sa sigurnošću utvrditi.

Izjava

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno koristeći dostupnu literaturu i znanje stečeno tijekom studija.

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Danielu R. Schneideru na savjetima pruženim tijekom izrade ovog rada.

Bruno Bogdan

Sadržaj

	Str.
Popis slika	
Popis tablica	
Popis oznaka i mjernih jedina fizikalnih veličina	
1. UVOD	12
2. ZBRINJAVANJE OTPADA	16
2.1. Komunalni otpad	16
2.2. Količina otpada u Republici Hrvatskoj	17
2.3. Načini zbrinjavanja otpada	19
2.4. Tehnologije termičke obrade komunalnog otpada	20
3. RASPLINJAVANJE OTPADA	27
3.1. Opis tehnologije rasplinjavanja	27
3.2. Teorija rasplinjavanja	33
3.3. Energetske značajke postupka rasplinjavanja	40
3.4. Zaštita okoliša	42
3.5. Međunarodna iskustva	45
4. POSTROJENJE ZA ENERGETSKU OPORABU KOMUNALNOG OTPADA RASPLINJAVANJEM	51
4.1. Sustav za rasplinjavanje	51
4.1.1. Teorijska podjela rasplinjača	52
4.1.1.1. Istosmjerni rasplinjač	
4.1.1.2. Protusmjerni rasplinjač	
4.1.1.3. Unakrsni rasplinjač	
4.1.2. Izvedbena podjela rasplinjača	56
4.1.2.1. Rasplinjavanje u fiksnom sloju	
4.1.2.2. Rasplinjavanje u fluidiziranom sloju	
4.2. Sustav za pročišćavanje sintetskog plina	59

4.3. Postrojenje za dobivanje električne energije	63
4.3.1. Generator pare (parno postrojenje)	63
4.3.2. Plinski motor	64
4.3.3. Plinska turbina (kombinirano postrojenje)	65
5. TEHNO-EKONOMSKI PRORAČUN POSTROJENJA ZA ENERGETSKU OPORABU KOMUNALNOG OTPADA	68
5.1. Postrojenje s plinskim motorom	69
5.1.1. Rasplinjač	69
5.1.2. Sustav za čišćenje sintetskog plina	72
5.1.3. Plinski motor	73
5.1.4. Financijski plan	75
5.1.5. Analiza osjetljivosti	81
5.2. Usporedba plinskog i kombiniranog postrojenja	84
5.2.1. Kombinirano postrojenje	86
5.2.2. Financijska usporedba	88
6. ZAKLJUČAK	92

Literatura

Popis slika

Slika 1.1. Gospodarenje otpadom u Europi u 2005. godini

Slika 2.1. Odlagalište Jakuševac

Slika 2.2. RDF

Slika 2.3. Postrojenje za izgaranje netretiranog otpada

Slika 2.4. Postrojenje za pirolizu

Slika 3.1. Rasplinjač

Slika 3.2. *Mollier-Hofmannov* dijagram

Slika 3.3. Proces rasplinjavanja i čišćenja sintetskog plina tvrtke *TPS Termiska*

Slika 3.4. TPS proces u Grève-in-Chianti

Slika 3.5. Skica postrojenja u Lahtiju, Finska

Slika 3.6. Shema procesa u Rüdersdorfu, Njemačka

Slika 4.1. Prikaz postrojenja za energetske uporabu komunalnog otpada

Slika 4.2. Istosmjerni rasplinjač

Slika 4.3. Protusmjerni rasplinjač

Slika 4.4. Unakrsni rasplinjač

Slika 4.5. Podjela VFB rasplinjača

Slika 4.6. Podjela rasplinjača s fluidiziranim slojem

Slika 4.7. Plinski motor kompanije Wärtsila

Slika 4.8. Kombinirani ciklus

Slika 4.9. Plinska turbina

Slika 5.1. Shema analiziranog postrojenja

Slika 5.2. Odabrani rasplinjač

Slika 5.3. Analiza osjetljivosti projekta u ovisnosti o različitim parametrima

Slika 5.4. Analiza osjetljivosti utjecaja ogrjevnih vrijednosti RDF-a.

Slika 5.5. Analiza osjetljivosti utjecaja kretanja iskoristivosti rasplinjača

Slika 5.6. Shema kombiniranog postrojenja

Slika 5.7. Usporedba analiziranih postrojenja

Popis tablica

Tablica 2.1. Kategorija i broj odlagališta prema Katastru

Tablica 2.2. Sastav komunalnog otpada u RH

Tablica 3.1. Stupanj termičke iskoristivosti za različite tehnologije izgaranja

Tablica 3.2. Sastav sintetskog plina dobivenog u Lahtiju, Finska

Tablica 4.1. Usporedba različitih tipova rasplinjača

Tablica 4.2 Potrebna kvaliteta sintetskog plina

Tablica 4.3. Utjecaj određenih elemenata sintetskog plina

Tablica 4.4. Prednosti i nedostaci sustava za uklanjanje katrana

Tablica 5.1. Karakteristike RDF-a

Tablica 5.2. Karakteristike rasplinjača u planiranom postrojenju

Tablica 5.3. Karakteristike sintetskog plina

Tablica 5.4. Tehničke karakteristike plinskog motora

Tablica 5.5. Investicijski troškovi

Tablica 5.6. Pogonski troškovi

Tablica 5.7. Financijski uvjeti

Tablica 5.8. Tok novca

Tablica 5.9. Parametri rasplinjača

Tablica 5.10. Tok novca kombiniranog postrojenja

Popis oznaka i mjernih jedinica

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
L	m^3	količina zraka
η_T	%	teorijska iskoristivost rasplinjavanja
V_{SG}	m^3	volumen sintetskog plina
H_g	MJ/m^3	ogrjevnost vrijednost sintetskog plina
H_G	MJ/kg	ogrjevnost vrijednost utrošenog goriva
E_g	MW	energija sadržana u sintetskom plinu
\dot{m}_g	m_n^3/h	količina proizvedenog sintetskog plina
H_{dg}	MJ/m_n^3	ogrjevnost vrijednost sintetskog plina
η_{pm}	%	iskoristivost plinskog motora
P_{el}	MW	električna snaga
\dot{m}_{RDF}	kg/h	kapacitet RDF-a
n_R		broj rasplinjača
E_{RDF}	MW	energija sadržana u RDF-u
P_{VP}	MW	vlastita potrošnja postrojenja
P_{Nel}	MW	neto električna snaga
η_{PP}	%	iskoristivost plinskog postrojenja
E_{Nel}	MWh/god	godišnje neto proizvedena električna energija
D	€/god	godišnji prihod
R	€/god	iznos godišnje otplate zajma
k	%	kamatna stopa
G	€	ukupan iznos zajma
n		godina otplate
P_{el2}	MW	električna snaga kombiniranog postrojenja
P_{VP2}	MW	vlastita potrošnja kombiniranog

P_{Nel2}	MW	postrojenja neto električna snaga kombiniranog
η_{KP}	%	postrojenja iskoristivost kombiniranog
ΔP_{Nel}	MW	postrojenja razlika neto električne snage uspoređenih
D_2	€/god	postrojenja godišnji prihod kombiniranog postrojenja
ΔD	€/god	razlika prihoda uspoređenih postrojenja

1. UVOD

Iako je razvoj čovječanstva nešto čemu svi ljudi na svijetu teže i potreban nam je neizmjereno, usko je vezan i uz neke negativne popratne posljedice. Te negativne posljedice utjecale su na svijet kakav znamo danas. Uz povijesne probleme, kao što su sve veće razlike između ekonomskih klasa, država i društava, ljudi sve više postaju svjesni posljedica koje izazivaju svojim načinom života i kojima se mijenja život na Zemlji. Tu se u prvom redu misli na utjecaj na okoliš. Sve veći i brži razvoj utječe na veće zagađenje Zemlje i njezine atmosfere.

Jedan od pokazatelja razvoja društva je i proizvodnja otpada. Sve do nedavno, nije se vodilo dovoljno računa o takvim stvarima, međutim, došao je trenutak kada se čovjek mora pozabaviti svim aspektima njegova utjecaja na okoliš. Prilikom odlaganja otpada stvaraju se staklenički plinovi kao što su metan (CH_4), ugljikov dioksid (CO_2), te didušikov oksid (N_2O) koji direktno utječu na stanje atmosfere. Velika količina otpada koji se odlaže u blizini većih naselja ili gradova negativno utječe na zdravlje ljudi, ali i kvalitetu života općenito. U trenutku kada se vode velike rasprave o globalnom zatopljenju, kao najvažnijem negativnom aspektu čovjekova utjecaja na okoliš, zbrinjavanje otpada jednostavno nije moglo ostati postrance. Topljenje ledenih kapa, povećanje temperature zraka, nestabilni vremenski uvjeti, zagađenje voda i dr. neki su od ekoloških razloga zbog kojih se morala posvetiti povećana pažnja problemu zbrinjavanja otpada. Na drugoj su strani energetske razlozi, kao što je smanjenje zaliha raznih energenata te uporaba materijala zbog kojih se održivo zbrinjavanje otpada nameće kao važno rješenje čovjekova razvoja.

Aдекватно zbrinjavanje otpada i iskorištavanje otpada u svrhu dobivanja materijala i energije, postalo je nužnost suvremenog razvijenog svijeta. Netretirani otpad odlagati na odlagališta pokazuje se kao najgore moguće rješenje, te se krenulo ka ukidanju takvog načina rješavanja otpada. Kao prvo, nastaju plinovi izrazito štetni za atmosferu (metan), radi se o ogromnim količinama otpada za koje je sve manje mjesta, ali se ujedno gubi velika količina energije koju je danas moguće dodatno iskoristiti. Zato je

od iznimne važnosti tu energiju vratiti, korištenjem najučinkovitijih, čistijih tehnologija. Tu se misli na reciklažu kao vraćanje već potrošene energije, a sprječavanje nove potrošnje, anaerobnu digestiju, mehaničku i biološku obradu, direktno izgaranje ili naprednije termičke obrade, rasplinjavanjem ili pirolizom. Jasno da najbolja tehnologija ne postoji, već je potrebno koristiti raznovrsne tehnologije, radi bržeg i boljeg napretka.

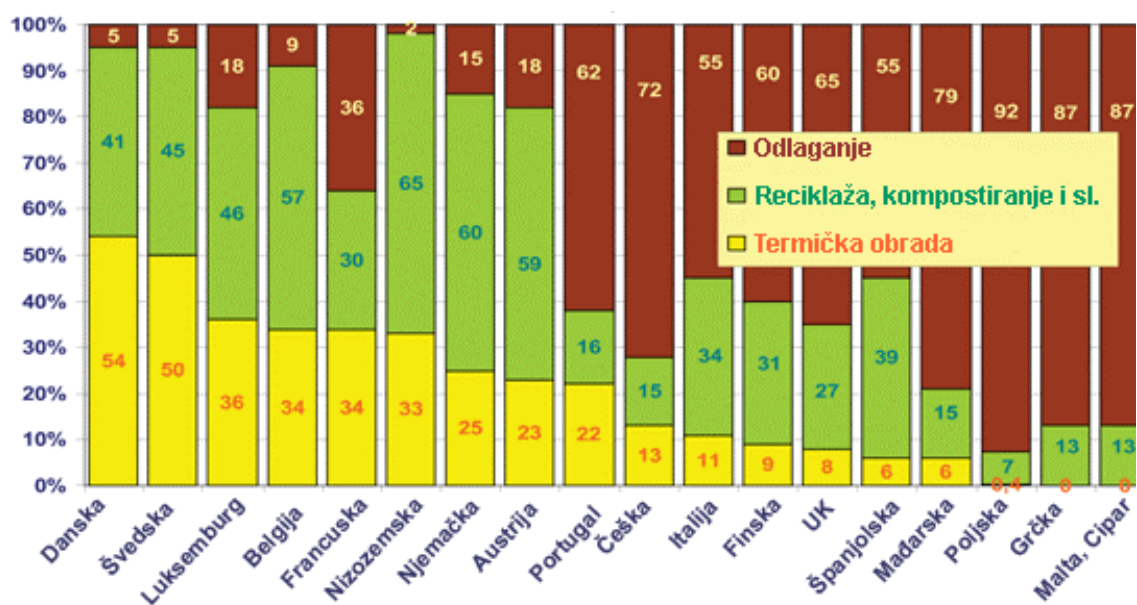
Zbrinjavanjem otpada smanjuje se volumen (do 90 %) i masa (do 75 %) krute tvari otpada, te se uništavaju potencijalno opasne tvari iz otpada. Ostatke je isto tako moguće koristiti kao sirovine u nekim drugim industrijama (niskogradnja). Energija iz otpada je postala važna stavka u integriranom programu gospodarenja otpadom. To je alternativni izvor energije, koji zamjenjujući fosilna goriva pomaže u smanjenju stvaranja stakleničkih plinova, te ujedno povećava udio obnovljivih izvora u stvaranju električne energije. Ipak, dimni plinovi nastali zbrinjavanjem otpada štetni su i moraju proći postupak pročišćavanja, nakon čega se smiju ispustiti u atmosferu. Iako postrojenja za zbrinjavanje otpada emitiraju stakleničke plinove, ona pridonose smanjenju količine emitiranih stakleničkih plinova koja bi se emitirala kada bi se otpad odlagao na odlagalištima. Na odlagalištima se razvija metan (CH_4) koji ima 21 puta veći staklenički potencijal od ugljikovog dioksida. Iz tog razloga se često na odlagalištima otpada spaljuje metan na bakljama, pretvarajući ga u ugljikov dioksid (CO_2).

Kao i neka druga industrijska postrojenja, i postrojenja za energetske oporabu otpada naišla su na negativne stavove društva koja koče njihov brži razvoj, iz više razloga. Najčešći razlog je poznat kao NIMBY efekt (eng. *Not In My Back Yard*), što bi značilo da ljudi ne žele velika postrojenja u blizini življenja, što zbog straha od havarija, zagađenja i sl. Međutim, strana iskustva, iz Nizozemske, Velike Britanije, Austrije, Danske, pokazuju kako se edukacijom i dijalogom takvi problemi mogu prevladati. Čak su i određene međunarodne studije pokazale kako se, u koliko se takva postrojenja pridržavaju zakonskih okvira, javlja samo mali rizik od zdravstvenih problema lokalnog stanovništva [1]. Osim edukacije i dijaloga, moguće je i određenim propisima od strane države, osvijestiti ljude da percipiraju potrebne promjene. Tako je Austrija, kako bi smanjila količinu otpada na odlagalištima, počela naplaćivati 280 €

za tonu otpada koji dođe na odlagalište. Danska je počela graditi postrojenja blizu naselja, te je ljudima bilo u interesu kupovati jeftiniju električnu i toplinsku energiju.

U Republici Hrvatskoj je 2006. godine prikupljeno nešto manje od 2.000.000 tona otpada, te je sve pohranjeno na odlagališta. Nepostojanje adekvatnih postrojenja gorući je problem i kad je u pitanju pristup Republike Hrvatske u Europsku Uniju. Postrojenje za termičku obradu opasnog otpada postojalo je do 2007. godine (PUTO), minornog kapaciteta, ali je moralo biti zatvoreno.

Zadnjih par godina, puno se radilo na zakonskom okviru zbrinjavanja otpada, pa je tako Hrvatska u potpunosti zaokružila taj dio, međutim tih se propise ne pridržavaju svi. Zemlje Unije nemaju toliku zakonsku osnovu kao što sada ima Hrvatska, ali što je možda i najvažnije, postoje institucije i inspektorati koji paze da se propisi u potpunosti izvršavaju i da ih se svi pridržavaju, međutim problem je još uvijek nezadovoljavajuća provedba svih donesenih propisa. I tako dok Hrvatska 2009. godine reciklira tek par posto proizvedenog otpada, Nizozemska je već 2005. godine na odlagalištima zbrinjavala manje od 5 % od ukupne količine otpada. Slika 1.1. pokazuje da odmah iza Nizozemske slijede Danska i Švedska, s malo slabijim rezultatima, dok su na začelju Poljska, s 92 % odloženog otpada, te Grčka i Malta.



Slika 1.1. Gospodarenje otpadom u Europi 2005. godine [2]

Gospodarenje otpadom se nameće kao najproblematičnije područje zaštite okoliša u Republici Hrvatskoj. Kapaciteti oporabe, recikliranja i zbrinjavanja su nedostatni i daleko ispod europskih standarda, najveći dio otpada se odlaže na odlagalištima, broj smetlišta (tj. divljih odlagališta) barem je osam puta veći od broja službenih odlagališta, a ni ta najvećim dijelom ne udovoljavaju propisima iako su trenutačno u postupku zatvaranja ili sanacije u cilju dovođenja u zadovoljavajuće stanje.

2. ZBRINJAVANJE OTPADA

2.1 Komunalni otpad

Otpad se odnosi na materijal koji je nastao kao posljedica čovjekove djelatnosti, dok je cilj zbrinjavanja otpada smanjenje utjecaja otpada na okoliš i čovjekovo zdravlje. Ujedno se pod tim pojmom smatra i uporaba otpada s ciljem dodatnog iskorištenja energije. Otpad se dijeli:

- prema mjestu nastanka na komunalni otpad i proizvodni otpad, a tu razlikujemo ambalažni otpad, građevni otpad, električni otpad i dr.,
- u ovisnosti o svojstvima, otpad dijelimo na opasni, neopasni i inertni [3].

Komunalni otpad

Komunalni otpad je otpad iz kućanstava, otpad koji nastaje čišćenjem javnih površina i otpad koji je po svojstvima i sastavu sličan otpadu iz kućanstva, a koji nastaje u gospodarstvu, ustanovama i uslužnim djelatnostima. Dijelimo ga na sljedeće kategorije:

- biorazgradivi otpad,
- papir i karton,
- staklo,
- polimeri, plastične mase,
- metali,
- razni predmeti iz kože, tekstila i dr.,
- opasni otpad,
- krupni otpad.,

Proizvodni otpad

U ovoj skupini otpada razlikujemo niz podskupina, kao što su ambalažni, građevni, električni otpad i dr..

Ambalažni otpad je ambalaža preostala nakon što se proizvod raspakira, a obuhvaća sve proizvode u obliku kutija, posuda, omota i druge oblike koji služe držanju drugog proizvoda u svrhu njegove zaštite, rukovanja i dr.. U građevni otpad spada otpad koji je nastao kao posljedica izvođenja građevinskih radova. Tu se misli na građevinsku šutu, cigle, crijepove, žbuku, zatim ostatke materijala nakon izvršenih radova na prometnicama te iskope raznih vrsta tla.

2.2. Količina otpada u Republici Hrvatskoj

Godine 2006. u Republici Hrvatskoj prikupljeno je 1.894.361 tona komunalnog otpada od toga 92 % ili 1.744.922 tona miješanog komunalnog otpada [4]. Najviše otpada sakupljeno je u Gradu Zagrebu 492.533 tona komunalnog otpada, što je 26 % ukupno sakupljenog, a zatim slijede Splitsko-dalmatinska županija s 14 % pa Primorsko-goranska županija s oko 8 %. Sva ta količina sakupljenog komunalnog otpada bila je upućena na odlagališta.

Tablica 2.1. Sastav komunalnog otpada u RH [4]

Komponenta otpada	Udio [%]
Kuhinjski biootpad	43,1
Papir i karton	19,6
Koža i kosti	3,0
Drvo	1,3
Tekstil	7,8
Staklo	6,6
Metali	4,1
Inertni	1,5
Plastika	11,6
Guma	0,9
Posebni	0,4

Na području Republike Hrvatske djeluje 209 tvrtki koje skupljaju i odvoze komunalni otpad na odlagališta. Za postupanje s neopasnim otpadom registrirano je 245 tvrtki, s opasnim otpadom njih 86, dok su 182 registrirana izvoznika otpada.

Agencija za zaštitu okoliša pokrenula je 2004. godine projekt Katastar odlagališta [5], te su za sada prikupljeni podaci od gotovo svih lokalnih samouprava. Katastar sadržava podatke o:

- odlagalištu - opći podaci (naziv, adresa, koordinate, vlasništvo),
- površini, kapacitetu, količinama odloženog otpada, području s kojeg se dovozi otpad,
- vrstama otpada koje se odlažu te vrstama (pred)obrade,
- statusu operativnosti i eventualnim planovima,
- statusu dozvola/dokumentacije,
- opremljenosti odlagališta,
- primijenjenim mjerama zaštite okoliša,
- glavnim obilježjima lokacije,
- onečišćenju pojedinih komponenti okoliša,
- praćenju stanja na odlagalištu.

U Katastru se nalazi baza od 283 registrirana odlagališta čiji je ukupan kapacitet 68.098.070 m³, dok je količina odloženog otpada 34.053.613 m³. Donja tablica pokazuje podjelu i broj odlagališta otpada. Na velikim odlagalištima, kojih je kao što se vidi iz Tablice 1. ukupno 60, odloženo je oko 85 % sveukupnog odloženog otpada u Hrvatskoj, te istoj toj skupini potencijalno gravitira oko 72 % ukupnog stanovništva zemlje.

Tablica 2.2. Kategorija i broj odlagališta prema Katastru

Kategorija odlagališta	Broj odlagališta	
	Mala	Velika
Legalna	7	18
U postupku legalizacije	17	23
Službena	17	19
Dogovorna	86	0

Daleko najveće odlagalište je zagrebački Prudinec u Jakuševcu, na koji se odnosi čak 20 % ukupnog kapaciteta i ukupno odloženog otpada u Republici Hrvatskoj. Godine

1964. započeto je odlaganje otpada na to odlagalište, površine 481.301 m². Sanacija odlagališta završena je 2003. godine, te sada odlagalište može primiti 510.000 m³ otpada godišnje.



Slika 2.1. Odlagalište Jakuševac, desno prije lijevo nakon sanacije

2.3. Načini zbrinjavanja otpada

Načini zbrinjavanja otpada:

- Termička obrada otpada,
- Mehaničko-biološka obrada otpada (MBO),

Termička obrada otpada

Termičkom obradom komunalnog otpada smanjuje se volumen i masa otpada, te se izdvajaju ili uništavaju potencijalno opasne tvari iz otpada. Produkti termičke obrade mogu biti ili izravno toplina ili plin koji se kasnije može koristiti kao gorivo u kogeneracijskim postrojenjima za proizvodnju toplinske i električne energije. Takva postrojenja se tada nazivaju energane na otpad (ENO).

Procesi termičke obrade otpada dijele se na:

- spaljivanje,
- rasplinjavanje,
- pirolizu.

Kao glavni ciljevi termičke obrade otpada mogu se smatrati sljedeći ciljevi:

- Smanjenje mase i volumena otpada,

- Smanjenje udjela organskih tvari u otpadu,
- Uništavanje organskih štetnih tvari,
- Izdvajanje anorganskih tvari (plemeniti metali i dr.),
- Iskorištenje energije pohranjene u otpadu.

Mehaničko-biološka obrada otpada

Procesima mehaničke i biološke obrade otpada reduciraju se količine biorazgradivog otpada, te se omogućuje povrat korisnih sirovina iz otpada. Mehanički dio obrade otpada sastoji se od usitnjavanja, drobljenja, mljevenja te peletizacije nakon čega otpad ide na biološku obradu. Biološka obrade sastoji se od anaerobne fermentacije, kompostiranja, bio-sušenja, koji se mogu provoditi sa (aerobna) ili bez (anaerobna) prisutnosti kisika.

Ciljevi mehaničko-biološke obrade otpada mogu se podijeliti na:

- Produkcija bioplina
- Maksimiziranje količine obnovljivih sirovina
- Produkcija komposta
- Produkcija GIO (gorivo iz otpada)
- Produkcija biostabiliziranog materijala za odlaganje.

2.4. Tehnologije termičke obrade komunalnog otpada

Termičkom obradom komunalnog otpada mora se iskoristiti energija pohranjena u otpadnu, dok se samo posebne vrste otpada i opasni otpad mogu spaljivati bez energetske uporabe. Postrojenja za termičku uporabu komunalnog otpada moraju biti u skladu s najvišim standardima u pogledu učinkovitog uništavanja otpada i zaštite okoliša.

Otpad koji se javlja nakon termičke obrade može se podijeliti u dvije grupe: [6]

1. otpad nastao kao ostatak nakon termičke obrade otpada,
2. otpad koji je nastao pročišćavanjem dimnih plinova te otpadne vode iz procesa čišćenja.

Otpad koji je nastao uslijed termičke obrade često se koristi u mnogim drugim industrijama, kao što je cestogradnja, dok se otpad nastao čišćenjem mora određenim procesima stabilizirati i adekvatno deponirati kako ne bi ugrožavao okoliš.

Tehnologije tehničke obrade komunalnog otpada mogu se podijeliti na dvije glavne grupe, na temelju pripreme ulaznog otpada:

1. ukupni, nepripremljeni otpad. Spaljivanje na rešetci (mehanički usitnjen).
2. prethodno tretirani otpad. Sortiranje i usitnjavanje su obavezne mjere prije izgaranja u fluidiziranom sloju, rasplinjavanja ili pirolize.

Još jedna od glavnih podjela tehnologija termičkih obrada je u pogledu potrebnog kisika za reakciju. Tako tehnologije rasplinjavanja i pirolize koriste manje ili ne koriste kisik u odnosu na izgaranje. Upravo i glavna bit rasplinjavanja i pirolize je da se reakcije odvijaju s što manje kisika zbog specifičnosti koje će biti navedene u konkretnim podjelama.

Izgaranje

Izgaranje je proces termičke obrade u kojem se dovodi više kisika nego je stehiometrički potrebno kako bi sav otpad oksidirao i pri tome iskoristio sav kemijski potencijal otpada. Višak zraka se dovodi upravo da se omogući potpuno izgaranje, odnosno nastajanje ugljikovog dioksida i vodene pare, ostavljajući samo u tragovima ugljik u pepelu. Proces izgaranja se odvija na temperaturi oko 1.000 °C, što je i najviša temperatura procesa termičke obrade.

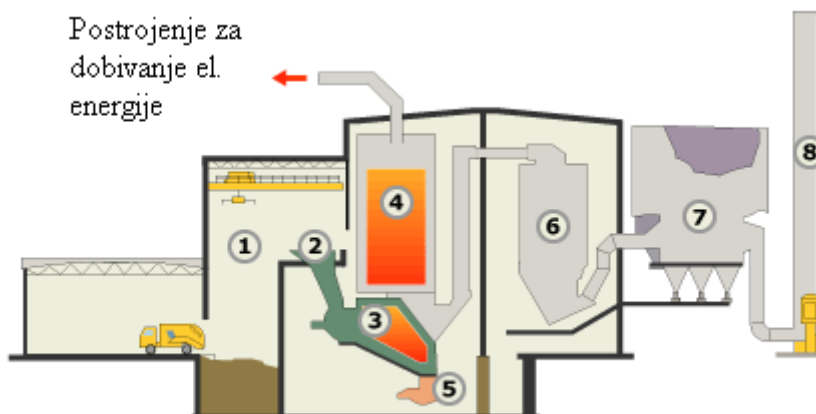
Za izgaranje se može koristiti nerazvrstan, mješoviti otpad (eng. *mass burn*) ili gorivo iz otpada (*GIO* ili eng. *RDF*). Jasno da je izgaranje nerazvrstanog i mješovitog otpada najjednostavniji oblik izgaranja, međutim to nosi i dosta negativnih stvari. Ogrjevna vrijednost otpada je mala, te je potrebno koristiti dodatno gorivo. Ukoliko se koristi gorivo iz otpada, ogrjevna vrijednost je veća, međutim, predobrada otpada zahtjeva više utrošene energije ili veća investicijska sredstva.

Gorivo iz otpada (eng. *RDF* - *Refuse-derived fuel*) je mehanički obrađen kruti komunalni otpad kao što prikazuje slika 2.2.. Mehanička obrada sastoji se od usitnjavanja i sušenja otpada koja se odvija u pretvaraču ili tretiranju otpada parom i tlakom u autoklavu. RDF se većinom sastoji od organskih sastojaka komunalnog otpada kao što je biorazgradivi otpad i raznih ostataka. Postrojenja za proizvodnju RDF-a najčešće se nalaze blizu izvora otpada, te su u većini popraćena spalionicama.



Slika 2.2. RDF

Izgaranje ukupnog netretiranog otpada na rešetci je najzastupljenija i najispitivanija tehnologija termičke obrade. Pogodna je za obradu velikih količina otpada od 500.000 t/god, pa sve do milijun tona godišnje.



Slika 2.3. Postrojenje za izgaranje netretiranog otpada

1. Prostor za dopremu komunalnog otpada, s dizalicom na vrhu 2. Lijevak za punjenje generatora pare 3. Izgaranje otpada 4. Isparivačke površine generatora pare 5. Odvod pepela iz generatora pare, nakon čega se magnetima uklanjaju metali za reciklažu 6. Uklanjanje SO_x i dioksina iz dimnih plinova 7. Elektrostatički i vrećasti filter za uklanjanje prašine iz dimnih plinova 8. Dimnjak

Ukoliko se otpad obradi, sortira i mehanički obradi, te kao takav više nije netretiran, koristi se kao gorivo iz otpada. Kao takav, otpad ima veću ogrjevnju vrijednost, ali i omogućava upotrebu novije, sofisticiranije tehnologije, poput izgaranja u fluidiziranom sloju.

Gorivo se kontinuirano dodaje u fluidizirani sloj, koji čini smjesa zraka i inertnog materijala, najčešće kvarcnog pijeska. Homogenost goriva i dobro miješanje omogućuje odličnu temperaturnu raspodjelu i udio kisika u cijelom ložištu, te je kao takav proces vrlo stabilan. Da bi se postigle te prednosti, otpad mora biti fino pripremljen s česticama ne većim od 50 mm promjera. Predobrada, kao što je ranije već navedeno, dosta poskupljuje takva postrojenja. Ipak, izgaranje u fluidiziranom sloju ima niz prednosti, kao što su velika iskoristivost ložišta (oko 90 %), nema pomičnih dijelova, što čini postrojenje jednostavnijim, manji su operativni troškovi, zbog nižih temperatura u procesu manje je stvaranje NO_x i dr.

U budućnosti se puno očekuje od tehnologije izgaranja u fluidiziranom sloju. Jedno od rješenja šire upotrebe ove tehnologije je i u selektivnom prikupljanju otpada. Smanjili bi se troškovi predobrade, ali i zbog veće kontrole otpada, zahtjevi na čišćenje dimnih plinova bi se smanjili, te tako postrojenje učinili prihvatljivijim.

Rasplinjavanje

Rasplinjavanje je postupak oporabe otpada s ciljem dobivanja sintetskog plina (eng. *syngas*). Postupak se vrši u rasplinjaču, u kojem otpad degradira u struji zraka, pare, ili kisika. Proces se vrši s nedovoljno kisika, a teži se dobivanju sintetskog plina bogatog ugljik monoksidom, vodikom, metanom i višim ugljikovodicima. Ogrjevna moć

sintetskog plina kreće se od oko 5 do 10 MJ/m³. Sam proces odvija se na temperaturi od oko 800 do 900 °C.

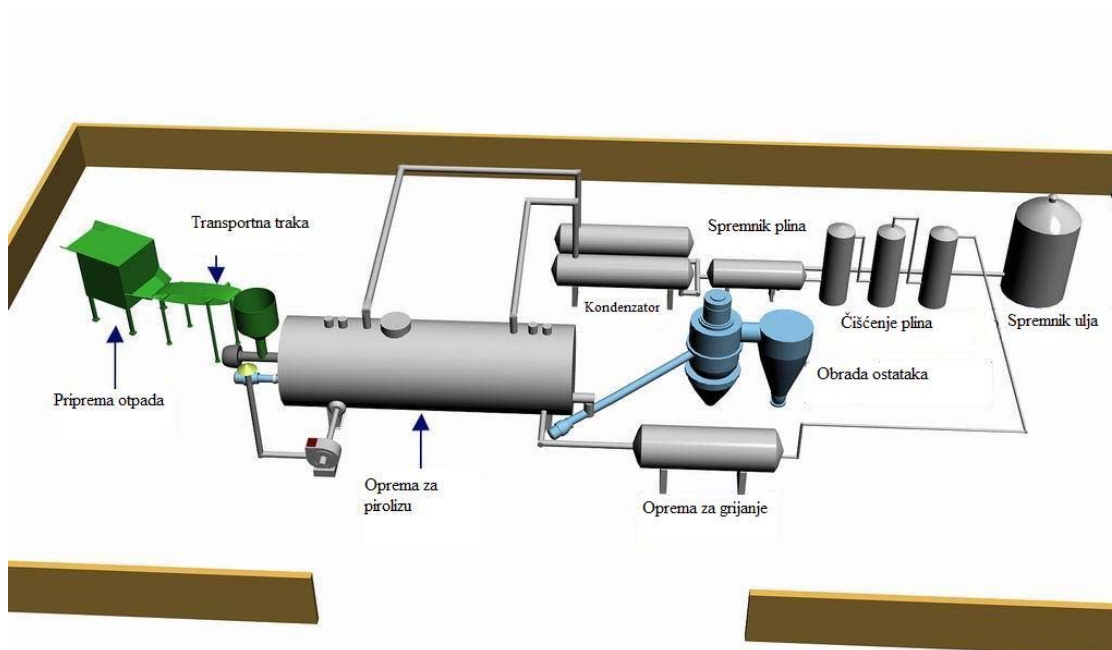
Glavne prednosti postupka rasplinjavanja pred izgaranjem su:

- sintetski plin se može koristiti za suspaljivanje odnosno, izgaranje fosilnog goriva sa sintetskim plinom pri čemu se smanjuju emisije NO_x,
- volumen isplinenog plina je tek oko 30 % volumena dimnih plinova nastalih prilikom izgaranja, što znači manje potrebne snage ventilatora i niže troškove opreme,
- rasplinjač se može koristiti u visoko efikasnim postrojenjima.

Kako je tema ovog rada upravo rasplinjavanje, u daljnjim poglavljima će se detaljnije objasniti postupak rasplinjavanja.

Piroliza

Za razliku od rasplinjavanja, piroliza je postupak degradacije tvari bez imalo kisika. Isto kao i kod rasplinjavanja, produkt je sintetski plin koji je bogat ugljikovim monoksidom, vodikom, metanom i višim ugljikovodicima, te još i katranom, parafinom i uljima. Kao ostatak javlja se kruti ostatak, koji je negoriv i zna često biti bogat ugljikom. Temperatura procesa je niža i od one kod rasplinjavanja, te se kreće od oko 300 do 800 °C. Za razliku od rasplinjavanja, budući da kod pirolize nije prisutan kisik, zbog toga sintetski plin dobiven pirolizom ima veću neto ogrjevnu moć, čija se vrijednost kreće od oko 10 do 20 MJ/m³.



Slika 2.4. Postrojenje za pirolizu

Upravo odvijanje procesa pirolize na nižim temperatura nego što je to kod izgaranja i rasplinjavanja, rezultira manjim isplinjavanjem ugljika i nekih drugih polutanata u sintetski plin. To direktno znači da će dimne plinove trebati manje čistiti te će se smanjiti investicijski troškovi. Ono što nije otplinjeno ostaje u krutom ostatku koji se mora adekvatno zbrinuti.

Piroliza je također, kao i rasplinjavanje, novija tehnologija, koja nije dovoljno istražena za slučaj obrade komunalnog otpada i za sada se koristi za manje kapacitete odnosno specifične vrste otpada. U odnosu na izgaranje, ove dvije tehnologije mogu se koristiti i za oporabu kemijske vrijednosti otpada (npr. u svrhu proizvodnje kemikalija ili motornih goriva), a tendencija je da se što više kemijskih produkata može koristiti kao sirovina za neke druge procese.

Sintetski plin

Postrojenja za termičku obradu otpada bazirana na tehnologijama rasplinjavanja i pirolize preferiraju otpad veće ogrjevne vrijednosti, kako bi se dobio sintetski plin više ogrjevne moći. A upravo taj sintetski plin čini najveću razliku između tehnologija za

termičku obradu otpada. Kako se pri izgaranju razvija samo toplinska energija, izgaranje kao tehnologija se može koristiti samo u kombinaciji s parnom turbinom. Takva postrojenja se konstruiraju za što veći kapacitet kako bi se učinkovitost povećala, međutim niti kao takva ne mogu postići iskoristivost veću od 25 % do eventualno 30 %, ili u najboljem slučaju kao kogeneracijsko postrojenje.

Kod rasplinjavanja i pirolize, dobiva se sintetski plin koji se koristi kao gorivo za dobivanje električne i/ili toplinske energije. Naravno, gorivo poput plina se onda može koristiti u više različitih kombinacija. Kao najjednostavnije rješenje nameće se plinski motor, a već i prosječni plinski motori imaju iskoristivost oko 25 %. Kao najnaprednija varijanta pokazuje se kombinirano plinsko-parno postrojenje, a iskoristivost takvog postrojenja mogla bi doseći i skoro 45 % u kogeneracijskoj varijanti.

3. RASPLINJAVANJE OTPADA

3.1. Opis tehnologije rasplinjavanja

Kruta goriva, kao što su ugljen, otpad, biomasa, mogu se oplemeniti, ako ih pretvorimo u plinovita. Oplemenjivanje goriva se koristi zbog lakšeg i boljeg korištenja plinskog goriva, što se odnosi na bolje miješanje sa zrakom potrebnim za izgaranje i na bolju regulaciju procesa [7]. Osim toga se plinsko gorivo može koristiti za izgaranje u kombiniranom postrojenju plinske i parne turbine koje služi za proizvodnju električne energije, ali može ostvariti i kogeneraciju električne i korisne toplinske energije. Prednost kogeneracijskog postrojenja u odnosu na ostala konvencionalna postrojenja je u tome što postiže daleko najveći stupanj termičke iskoristivosti.

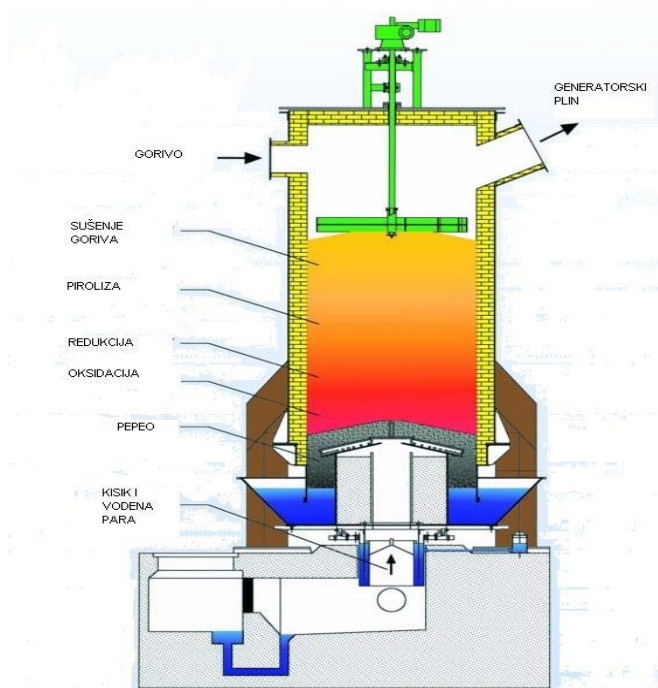
Dva glavna procesa oplemenjivanja krutih goriva su: piroliza i rasplinjavanje. Piroliza je proces suhe destilacije krutog goriva bez dovođenja kisika gorivu, a u svrhu stvaranja plina bogatog s H_2 i CO za korištenje u kemijskoj industriji.

Rasplinjavanje je proces nepotpunog izgaranja goriva s ciljem dobivanja sintetskog plina, bogatog ugljikovim monoksidom (CO), metanom (CH_4) i vodikom (H_2) kojega je moguće koristiti u raznim postrojenjima. Proces rasplinjavanja vodi se u plinskom generatoru ili rasplinjaču, čiji je zadatak u potpunosti rasplinuti gorivo, što se postiže dovođenjem kisika i vodene pare. Težište u ovom rada bit će dato na rasplinjavanje.

Kod postupka rasplinjavanja krutih goriva najvažnija su dva procesa: suha destilacija i generatorski proces ili rasplinjavanje. Oba procesa se odvijaju u generatoru i ovise jedan o drugome, međutim zbog izrazite kompleksnosti problema, potrebno je pojednostavljenje. O rasplinjavanju ovisi tok sveukupnog procesa u rasplinjaču, temperatura reakcije, te ujedno i tok suhe destilacije.

U rasplinjač ulazi gorivo i zrak te vodena para, a izlaze generatorski plin i otpaci ili troska. Sustavi rasplinjavanja generiraju kruti, tekući i plinoviti otpad. Kruti otpad je pretežno pepeo koji se većinom skuplja na dnu rasplinjača. Količine pepela variraju od 1 do 20% od ukupnog goriva, zavisno o vrsti goriva korištenog u rasplinjavanju. Plinoviti otpad se odnosi na moguće ispuštanje plina CO koji je veoma otrovan i može predstavljati opasnost za osoblje koje rukuje s rasplinjačem.

Iz slike 3.1. koja prikazuje rasplinjač, vidi se da gorivo ulazi na vrhu s lijeve strane, a generatorski plin izlazi na gornjoj desnoj strani. Kisik i vodena para se u generator dovode na dnu, gdje se taloži i pepeo. Na slici su vidljive sve faze koje se odvijaju u rasplinjaču, a to su redom od dna: oksidacija, redukcija, piroliza i sušenje goriva.



Slika 3.1. Rasplinjač

Ovisno o mjestu korištenja plina različite su i prednosti korištenja ovakvog sintetskog plina u odnosu na kruta goriva. Proces rasplinjavanja je zanimljiv iz raznih tehničkih aspekata. Puno je lakša i bolja regulacija snage u termoenergetskim postrojenjima. Predstavlja osnovu za tehnologiju korištenja ugljena s nultim emisijama, ali isto tako predstavlja mogućnost povećanja energetske efikasnosti termoenergetskih blokova na kruta goriva.

Prednosti tehnologije rasplinjavanja su:

- Jednostavan dizajn rasplinjača
- Visoka efikasnost korištenja energije iz krutih goriva
- Smanjivanje ovisnosti o uvoznim gorivima

Nedostaci:

- Dugo vrijeme starta
- Novija tehnologija

Plin dobiven u rasplinjačima se može koristiti u toplinske svrhe, odnosno za direktno izgaranje, u motorima s unutrašnjim izgaranjem i u plinskim turbinama, što bi zbog mogućnosti korištenja plina visoke temperature bilo veoma efikasno. No zbog nemogućnosti dobivanja potpuno čistog plina, a izrazito velikih troškova čišćenja plina, te kad se doda osjetljivost plinske turbine na nečistoće pri visokim temperaturama, ta se tehnologija nije još dovoljno istražila. Zbog ovih razloga, većina aplikacija tehnologije rasplinjavanja je u toplinske svrhe i u korištenju dobivenog plina u motorima s unutrašnjim izgaranjem.

Velika većina današnjih rasplinjača radi u svrhu dobivanja plina koji se koristi za izravno izgaranje. Razlog tomu su manji zahtjevi na čistoću plina, kao i na ogrjevnu vrijednost plina. Prednost korištenja rasplinjavanja i naknadnog spaljivanja dobivenog plina, u odnosu na direktno spaljivanje korištenog goriva u rasplinjačima, je u mogućnosti povećanja temperature izgaranja, boljem miješanju sa zrakom, te isto tako manjim potrebnim pretičkom zraka, što dovodi do povećanja efikasnosti izgaranja.

Svi tipovi rasplinjača se mogu koristiti za proizvodnju plina za potrebe direktnog spaljivanja, no radi jednostavnije konstrukcije najčešće se koriste protusmjerni rasplinjači za manje sustave (ispod 1 MW toplinske snage), a iznad te snage najčešće se koriste rasplinjači s fluidiziranim slojem. Većina sustava za spaljivanje konvencionalnih goriva može biti prenamijenjeno za korištenje plina dobivenog rasplinjavanjem.

Plin dobiven rasplinjavanjem se može koristiti i u toplinske svrhe. Prvotnim korištenjem rasplinjavanja krutog goriva i naknadnog spaljivanja dobivenog plina može se dosta povisiti efikasnost procesa dobivanja topline iz krutog goriva (bolja mogućnost regulacije, moguća viša temperatura izgaranja), nego samo s klasičnim spaljivanjem tog krutog goriva.

Snaga koju će motor razvijati direktno ovisi o ogrjevnoj vrijednosti i kemijskom sastavu plina koji se dobiva u rasplinjaču. Uglavnom, zbog manje ogrjevnice moći dobivenog plina, dolazi do smanjenja snage kod korištenja plina iz rasplinjača. Također uslijed strujanja plina kroz različite slojeve goriva u rasplinjaču, dolazi do pada tlaka što isto doprinosi padu ukupne snage (troši se snaga ventilatora, ili usisna snaga klipa kod motora). Procjena je da pri radu motora s unutarnjim izgaranjem koji koristi plin dobiven iz rasplinjavanja dolazi do smanjenja snage motora od 15 % u odnosu na rad na naftno gorivo. Nadalje, u usporedbi s motorima pogonjenim s fosilnim gorivima, goriva korištena u rasplinjavanju obično ne sadrže sumpor tako da nema emisija štetnih sumpornih oksida.

Najveći problem predstavlja generiranje većih količina tekućeg otpada, ponajviše kod protusmjernih tipova rasplinjača, npr. kod korištenja mokrih sustava za pročišćavanje sintetskog plina. U većini slučajeva dobiveni tekući otpad je veoma otrovan i nekontrolirano ispuštanje istog u okoliš može dovesti do zagađenja pitke vode i ostalih negativnih posljedica. Kod istosmjernih i unakrsnih rasplinjača većinom se koriste suhi sustavi za čišćenje plina što smanjuje količine tekućeg otpada. Također, ovaj problem ne postoji kod aplikacija rasplinjača u toplinske svrhe jer tamo ne postoji zahtjev za čišćenjem plina, gdje se plin koristi zajedno sa svim nečistoćama.

Zbog različitog kemijskog i morfološkog sastava, različita goriva imaju i posebne zahtjeve na metodu rasplinjavanja i zbog toga zahtijevaju različite konstrukcije rasplinjača. To znači da „univerzalni“ rasplinjač, koji bi se mogao koristiti sa svim ovim vrstama goriva ne postoji. Tako razlikujemo: protusmjerni, istosmjerni, unakrsni i rasplinjač s fluidiziranim slojem. Svaka od ovih vrsta rasplinjača će raditi optimalno, uzevši u obzir stabilnost rada, efikasnost i gubitak tlaka, samo u određenim granicama svojstava goriva od kojih su najvažnija [8]:

- ogrjevna vrijednost,

- količina vlage u gorivu,
- količina hlapljivih tvari,
- količina negorivih tvari i njihov kemijski sastav,
- reaktivnost goriva,
- veličina čestica goriva i homogenosti goriva,
- gustoća goriva.

Udio negorivih tvari u gorivu određuje koji je sustav potreban za pročišćavanje dobivenog plina. U praksi jedino gorivo koje ne sadrži negorive sastojke je visokokvalitetni drveni ugljen. Kao pravilo se uzima da se goriva s udjelom negorivih elemenata većim od 10 % trebaju koristiti u istosmjernim rasplinjačima, jer bi u protusmjernom veliki dio pepela ostao u dobivenom plinu.

Također pepeo može uzrokovati niz problema u korištenju rasplinjača. Stvaranje šljake i začepljenje rasplinjača, zbog topljenja i okrupnjavanja pepela dovodi do dodatne količine utrošenog rada (povećani gubici tlaka), i ako se mjere čišćenja ne poduzmu, može doći do prekomjernog taloženja katrana i do potpunog začepljivanja reaktora. U najgorem slučaju to može dovesti do prodora zraka i eksplozije, pogotovo kod protusmjernih rasplinjača. Da li će doći do prekomjernog taloženja pepela ovisi o kemijskom sastavu pepela, odnosno temperaturi topljenja pepela.

U pravilu taloženje se ne događa kod upotrebe goriva s udjelom pepela do 6 %, dok se s gorivom koje ima udio pepela iznad 12 % može očekivati znatnije taloženje. Za goriva s udjelima pepela od 6 – 12 % važno je poznavati temperature koje se postižu u reaktoru unutar rasplinjača. Ako su one više od temperature topljenja pepela dolazi do taloženja.

Istosmjerni i protusmjerni rasplinjači se mogu koristiti s gorivima koja sadrže veće količine pepela uz dodatne preinake kao što su automatski sustavi za trešnju rešetke. Rasplinjači s fluidiziranim slojem zbog veće mogućnosti regulacije temperature u reaktoru nemaju velikih problema s topljenjem pepela.

Reaktivnost goriva

Reaktivnost goriva je važan faktor koji određuje brzinu pretvorbe CO₂ u CO u rasplinjaču. Reaktivnost utječe na dimenzije reaktora, pošto propisuje visinu potrebnu za redukcijsku zonu unutar reaktora. Također ono određuje dinamička svojstva rasplinjača, odnosno brzinu promjene snage. Reaktivnost ovisi o vrsti goriva. Goriva kao što su drvo, drveni ugljen i treset su reaktivnija od kamenog ugljena, komunalnog otpada ili biomase. Također oblik i veličina čestica goriva utječe na reaktivnost goriva.

Reaktivnost goriva se može poboljšati s par procesa, kao što je tretman parom ili vapnom i natrijevim karbonatom. Također neki elementi kao što su cink i natrij djeluju kao katalizatori, odnosno povećavaju reaktivnost.

Veličina čestica i homogenost goriva

Istosmjerni i protusmjerni rasplinjači su ograničeni veličinom čestica goriva. Presitne čestice goriva mogu dovesti do povećanog otpora strujanju u redukcijskoj zoni i nedopustivog pada tlaka. Zbog toga dolazi do pada temperature i povećanog udjela katrana u plinu. S druge strane, prevelike čestice dovode do smanjenja reaktivnosti goriva, što dovodi do problema sa startom rasplinjača i loše kvalitete plina.

Važan faktor predstavlja i gustoća goriva; s povećanjem gustoće goriva smanjujemo dimenzije reaktora za zadanu snagu rasplinjača. Također, goriva s manjom gustoćom imaju problema sa strujanjem prema dolje uslijed manje težine goriva što dovodi do dobivanja plina s manjom ogrjevnom vrijednošću.

Nedovoljnu nasipnu gustoću goriva je moguće poboljšati briketiranjem i peletizacijom goriva. Najveći potencijal kao gorivo za rasplinjače u zemljama u razvoju predstavlja otpad, odnosno otpadna biomasa. Iz dosadašnjih iskustava, najbolji rezultat postignut je s ljuskama kokosa i klipovima kukuruza koji nisu postavljali probleme u uporabi rasplinjača s fiksnom rešetkom. Slama žitarica većinom posjeduje preko 10 % pepela, što dovodi do taloženja šljake u istosmjernim rasplinjačima. Ljuske riže imaju udjel preko 20 % pepela i zbog toga se do sada nije pokazalo kao povoljno gorivo za

rasplinjače. Najveći potencijal za oporabu komunalnog otpada predstavljaju rasplinjači s fluidiziranim slojem.

3.2. Teorija rasplinjavanja

Kao što je već navedeno u uvodu, u rasplinjaču se odvijaju dva procesa, a pozornost će biti posvećena toplinsko-tehnički zanimljivijem rasplinjavanju. Kako bi se lakše shvatila teorija rasplinjavanja, prvo će se objasniti rasplinjavanje čistog ugljika, što se poklapa s rasplinjavanjem koksa. Prikazat će se i opisati glavne jednačbe vezane uz proces rasplinjavanja. Ključno je to, da kod rasplinjavanja koksa ne dolazi do stvaranja metana (CH_4).

Zadatak rasplinjača je da potpuno rasplini zadano gorivo, pri čemu se teži što većem udjelu gorivog vodika (H_2) i ugljikovog monoksida (CO). Zahtjevi koji se postavljaju na proizvedeni plin su različiti ovisno o tome kojoj je svrsi plin namijenjen, dok je za potrebe ovog razmatranja cilj proizvesti plin za upotrebu u strojevima za proizvodnju energije. Glavni zahtjev koji se postavlja pred plin proizveden za takvu upotrebu je što veća ogrjevna vrijednost.

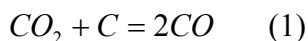
Tvari koje sudjeluju u slučaju rasplinjavanja su:

- gorivo,
- zrak ili čisti kisik,
- voda,
- troska (pepeo).

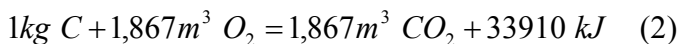
Produkt rasplinjavanja u općem slučaju je sintetski plin sastava:

- Ugljikov monoksid (CO),
- Vodik (H_2),
- Vodena para (H_2O),
- Ugljikov dioksid (CO_2),
- Dušik (N_2).

U rasplinjaču dolazi do nepotpunog izgaranja koksa uz dovođenje zraka. Oksidacija goriva odvija se sve dok ima slobodnog kisika. Na nekoj visini sloja goriva potrošit će se sav slobodan kisik, te će se tada CO₂ koji dalje nastrujava na svježije gorivo, zbog velike potrebe ugljika za kisikom iz svježeg goriva reducirati na CO, kao što je prikazano jednačbom (1).



Upravo ta redukcija je i temeljna bit rasplinjavanja, jer je potrebno u dobivenom plinu imati što više gorivog CO, a što manje CO₂. Stehiometrijske jednačbe stvaranja CO₂ i CO prikazane za 1 kg C

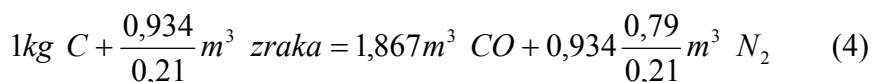


Vrijednost od 33910 kJ je ogrjevna moć ugljika za 1 kg.



U jednačbi (3) vidi se da se prilikom oksidacije u CO oslobađa toliko manje topline koliko odgovara neoslobođenoj ogrjevnoj moći proizvedenog ugljikovog oksida. U idealnom procesu, u kojem nema stvaranja CO₂, čitav će ugljik prijeći u 1,867 m³ CO, te će ogrjevna moć takvog plina biti 23,6 MJ po potrošenom ugljiku.

Gore navedene stehiometrijske jednačbe u sebi sadrže čisti kisik. Budući se u rasplinjač rijetko dovodi čisti kisik već zrak, čija je količina $L = \frac{O_2}{0,21}$, jednačba pravog procesa izgleda ovako:



Na taj se način dobiva puno više plina (5,377 m³) zbog udjela N₂, međutim, zato mu je narušena ogrjevna moć (4,3 MJ).

Teoretska iskoristivost

I u procesu sa čistim kisikom i u procesu sa zrakom, teoretska iskoristivost je jednaka i iznosi 70 %. Iskoristivost se u ovom slučaju definira kao omjer ogrjevnog moći proizvedene količine plina i ogrjevnog moći potrošenog goriva:

$$\eta_T = \frac{V_{SG} \cdot H_g}{H_G} \quad (5)$$

gdje su:

V_{SG} - količina sintetskog plina koji nastaje iz jedinice količine goriva

H_g - ogrjevna moć goriva

H_G - ogrjevna moć potrošenog goriva.

$$\eta_T = \frac{23.600}{33.910} = 0,7 \quad (6)$$

Iz jednadžbe (6) vidi se da 30 % ogrjevnog moći goriva nije iskorišteno, te se pojavljuje kao osjetna toplina sintetskog plina. Budući se plin nakon procesa rasplinjavanja treba očistiti od prašine i katrana te se u tom procesu čišćenja gubi većina osjetne topline, poželjno je naći tehničko rješenje iskorištenja te topline prije nego plin uđe u proces čišćenja.

Procesi rasplinjavanja vodom

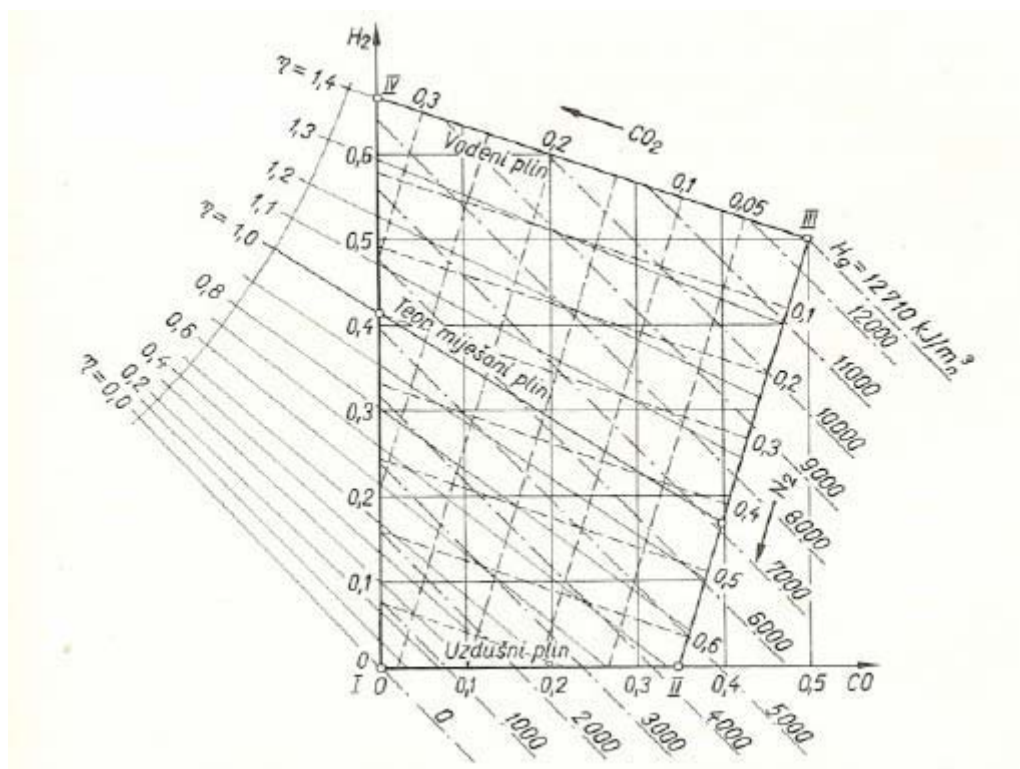
Kako bi se gubici osjetne topline smanjili, tijekom procesa rasplinjavanja dodaje se voda. To donosi dvije pozitivne stvari u proces rasplinjavanja. Prva je ta, da se na visokim temperaturama rastvara H_2O na H_2 i $\frac{1}{2}O_2$, što znači da dobivamo gorivi vodik, te se time troše velike količine topline. Druga pozitivna stvar je da se oslobođeni kisik može vezati s ugljikom, što znači da je potrebno manje dovodenje zraka, odnosno imat ćemo manje dušika u dobivenom plinu.

$$1\text{m}^3 (\text{H}_2\text{O}) + 12770 \text{ kJ} = 1\text{m}^3 \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{m}^3 \text{O}_2 \quad (7)$$

Jednadžba (7) pokazuje vezivanje topline na vodu, za njeno rastvaranje. Teoretski bi se mogla na taj način odvesti cjelokupna osjetna toplina, međutim, jasno je da je to u praksi nemoguće. Kada bi se i uspjelo postići takvo stanje, plinovi bi iz rasplinjača odlazili posve hladni, što je opet nemoguće jer su za konačnu brzinu reakcije potrebne temperature od nekoliko stotina stupnjeva.

U ovoj fazi razmatranja procesa rasplinjavanja, dolazi do velikih komplikacija. Budući, se u plinu očekuje i CO₂, potrebno je razmotriti, da li je dodavanje vode u proces pozitivna ili negativna stvar, jer se time stvara dodatni CO₂. S povećanjem udjela CO₂ u nastalom plinu, smanjuje se udio CO, što znači manja ogrjevnost plina. Dok se s druge strane time oslobađa više topline, koja može služiti za rastvaranje H₂O.

Sustavom jednadžbi rješava se taj problem, te se rješenja prikazuju *Mollier-Hofmannovim* dijagramom, koji prikazuje slika 3.2.. Za ovaj rad nije potrebno ići u detalje i objašnjavati izradu i čitanje takvog dijagrama, već će se u par crta objasniti najznačajnije točke.



Slika 3.2. Mollier-Hofmannov dijagram [7]

Zračni (uzdušni) plin – proces bez rastvaranja vode. Najznačajnije je da su u takvim razmatranjima $H_2 = 0$ i $CO_2 = 0$. Svi takvi procesi leže na apscisi dijagrama.

Miješani plin – se nalazi u području između zračnog i vodenog plina. To je područje između dva ekstremna slučaja i potrebno je poznavati egzaktanu točku u dijagramu kako bi se poznavao plin. Kod velikog udjela CO_2 opada udio CO , ali se zato povećava udio H_2 . Dok je kod manjeg udjela CO_2 ogrjevna moć plina veća, dobivene količine plina s H_2 su puno veće. Ovdje se samo htjelo pokazati kakav će plin biti dobiven s obzirom na vođenje procesa. Zbog mogućnosti postizanja puno viših temperatura izgaranja više se cijeni ogrjevna moć plina.

Vodeni plin – je karakterističan za izmjenično vođenje procesa. Prvo se proces vodi samo sa zrakom, te se postižu visoke temperature i dolazi do usijanja goriva. Tako dobiveni plin je vrlo loše kvalitete, te se najčešće spaljuje na baklji. Kada se postigne željena temperatura, prekida se dovod zraka i dovodi se samo voda. Time se sloj goriva naglo hladi i dobiva se plin bez dušika izrazito kvalitetan s najvećom mogućom ogrjevnom moći od $12,6 \text{ MJ/m}^3$. Jasno, takav rad je nemoguće voditi kontinuirano, te

je nakon određenog vremena potrebno ponovo dovoditi zrak a prestati s dovodenjem vode kako se rasplinjač ne bi ugasio.

Procesi rasplinjavanja čistim kisikom

Kada bi se u proces rasplinjavanja dodao čisti kisik, dobio bi se plin puno veće ogrjevnice moći, a i postigla bi se viša temperatura reakcije. Viša temperatura reakcije omogućava rastvaranje veće količine vodene pare, što povoljno utječe na kvalitetu dobivenog plina. Jasno, ako se u procesu rasplinjavanja u struju zraka doda čisti kisik, u samom procesu rasplinjavanja ima manje dušika. Što je udio dušika u dobivenom plinu manji, to je ogrjevnica moć plina veća, a manji su gubici osjetne topline proizvedenog plina. Značajno je to da se dodavanjem čistog kisika svejedno ne može premašiti ogrjevnica vrijednost vodenog plina odnosno $12,6 \text{ MJ/m}^3$. Međutim, u takvom procesu bi se periodičke izmjene koje se provode u cilju dobivanja vodenog plina značajno smanjile, ili u iznimnom slučaju s velikom količinom čistog kisika one bi i izostale.

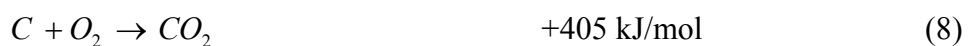
Proces dobivanja čistog kisika je vrlo skup, te se zbog toga rjeđe koriste takvi procesi. Kao nusprodukt proizvodnje dušika javlja se proizvodnja čistog kisika te je kao takva proizvodnja dušika idealan izvor čistog kisika.

Pojava ugljikovodika

Kao što je u uvodu rečeno, prvo se objasnilo rasplinjavanje bez pojave ugljikovodika, što odgovara rasplinjavanju koksa ili drvenog ugljena. U tom se slučaju radi lakšeg shvaćanja, pretpostavilo da u gorivu nema drugih rasplinjivih dijelova osim ugljika. Jasno, da prilikom rasplinjavanja bilo kojeg drugog goriva ta pretpostavka nije točna. Tako se pri rasplinjavanju ostalih goriva, kao što je i otpad, što je i na koncu tema ovog rada, stvaraju ugljikovodici. U tom se slučaju, u jednom dijelu rasplinjača odvija otplinjavanje ili suha destilacija. To je proces stvaranja ugljikovodika koji nastaju reakcijama suhe destilacije između svježeg goriva i nastalog plina. Kao najznačajniji predstavnik ugljikovodika je metan (CH_4). Prilikom nastajanja viših ugljikovodika potrebno je proširiti sustav jednadžbi, međutim ne dolazi se do nekih novih spoznaja.

Zbog nastalih ugljikovodika ogrjevna moć nastalog plina značajno raste, međutim tu se kao rezultat javlja stvaranje prekomjerne količine katrana.

Budući se ovaj rad bavi rasplinjavanjem komunalnog otpada, biti će nabrojane sve jednačbe kemijskih reakcija koje se odvijaju u rasplinjaču:



Najvažnije jednačbe koje utječu na sam proces rasplinjavanja, odnosno određuju tlak i temperaturu procesa su: redukcija ugljikovog dioksida (9), rastvaranje vode ili pare (12) te stvaranje metana (15).

Temperatura rasplinjavanja

Temperatura rasplinjavanja je od posebne važnosti za sastav plina. Ona ovisi o radnom tlaku, o polaznoj vlažnosti, predgrijavanju medija, te o molnom udjelu kisika u zraku. O ovoj temperaturi ovisi do koje će se mjere ugljikov dioksid CO_2 reducirati na gorivi CO, te koji će se udio vodene pare H_2O rastvoriti na kisik i vodik. Što je viša temperatura rasplinjavanja to će u pravilu generatorski plin sadržati više vodika H_2 ali i ugljikovog monoksida CO.

Rasplinjavanje pri višim tlakovima

U dosadašnjim razmatranjima, tlak u rasplinjaču uzimao se kao okolišni. Međutim, pokazuje se da je rasplinjavanje goriva puno bolje ako se vrši pri povećanom tlaku. S porastom tlaka rasplinjavanja raste i udio metana u plinu, što direktno utječe na ogrjevnu moć plina. Još jedan razlog rasplinjavanja pri povišenom tlaku je i kasnije lakše odstranjivanje CO₂ iz dobivenog plina, što opet utječe na ogrjevnu vrijednost plina.

Budući je vodena para koja se dodaje u proces rasplinjavanja već na povišenom tlaku, nju nije potrebno mijenjati. Zato je potrebno komprimirati zrak koji se dodaje i potrebno je osigurati pretkomoru dovoda goriva, kako se prilikom dodavanja goriva tlak u generatoru ne bi smanjio.

Dokazano je da se pri istoj temperaturi rasplinjavanja dobiva plin veće ogrjevne moći kako raste tlak u rasplinjaču [9].

3.3. Energetske značajke postupka rasplinjavanja

Stupanj termičke iskoristivosti kod konverzije otpada u sintetski plin iznosi 55-75 %. Iz toga je vidljiv relativno veliki gubitak energije koji služi da bismo pretvorili kruto gorivo (otpad) u gorivi plin. Kao što je uvedeno istaknuto, taj se gubitak kompenzira oplemenjivanjem goriva koje osigurava bolje miješanje sa zrakom za izgaranje i bolju regulaciju procesa te mogućnost korištenja u kombiniranom postrojenju.

Sintetski plin se mora dobro očistiti prije izgaranja u plinskom motoru ili plinskoj turbini zbog katrana i drugih nečistoća koje sadrži. Na visokim temperaturama koje se razvijaju prilikom izgaranja, katran i nečistoće bi se mogli taložiti na lopaticama plinske turbine i cilindru plinskog motora izazivajući koroziju i vibracije. Oprema za čišćenje, uz to što još uvijek nije dovoljno razvijena, značajno povećava troškove i kompleksnost, te smanjuje učinkovitost i pouzdanost postrojenja.

Prosječni neto stupanj iskoristivosti proizvodnje električne energije kod rasplinjavanja u velikoj mjeri ovisi o načinu proizvodnje električne energije. U tablici 3.1. su dane orijentacijske vrijednosti stupnja termičke iskoristivosti za različite tehnologije proizvodnje električne energije.

Tablica 3.1. Stupanj termičke iskoristivosti za različite tehnologije izgaranja

Tehnologija	Stupanj iskoristivosti
Parna turbina	14-20 %
Plinski motor	18-25 %
Kombinirano postrojenje	26-35 %

Ukupni stupanj termičke iskoristivosti za različite tehnologije izgaranja otpada, koji je prikazan u tablici 3.1., obuhvaća procese rasplinjavanja, pročišćavanja i izgaranja sintetskog plina. U odnosu na direktne tehnologije izgaranja u konvencionalnim postrojenjima, vrijednosti su osjetno niže zbog:

- gubitka rasplinjavanja,
- relativno niske ogrjevnice vrijednosti otpada,
- gubitka zbog pročišćavanja sintetskog plina,
- relativno male snage postrojenja.

Naime, zbog toga što tehnologija rasplinjavanja otpada i korištenja sintetskog plina u plinskom motoru i plinskoj turbini još uvijek nije u dovoljnoj mjeri razvijena, do sada izgrađena postrojenja su malih snaga, što ima za posljedicu povećanje investicijskog troška po jedinici snage i slabiji stupanj termičke iskoristivosti. Zbog toga se sintetski plin često koristi kao zamjensko gorivo u konvencionalnim termoelektranama, toplanama ili industrijskim postrojenjima koja su većih snaga i dimenzija te imaju bolji stupanj termičke iskoristivosti proizvodnje električne energije. Pri tome se sintetski plin suspaljuje zajedno s fosilnim gorivom, pri čemu stupanj iskoristivosti koji se može pridružiti udjelu goriva dobivenog rasplinjavanjem raste na oko 25-35 % za postrojenje s parnom turbinom.

Suspaljivanje u konvencionalnom postrojenju s parnom turbinom uglavnom ne zahtijeva pročišćavanje sintetskog plina niti njegovo hlađenje (u jednoj fazi

pročišćavanja), čime se izbjegava gubitak osjetne topline sintetskog plina, zatim ulaganje u skupocjenu opremu za pročišćavanje te gubitak godišnje raspoloživosti postrojenja zbog nedovoljne razvijenosti opreme za pročišćavanje.

Osim energetskog iskorištavanja sintetskog plina dobivenog rasplinjavanjem otpada, sintetski plin se još može koristiti kao sirovina za dobivanje npr. metanola u kemijskoj industriji.

3.4. Zaštita okoliša

Kao što je ranije rečeno, sintetski plin se uglavnom sastoji od sljedećih produkata rasplinjavanja: H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2O i N_2 . Nakon rasplinjavanja ostaju još i kruti ostaci, šljaka i pepeo.

Izgaranjem sintetskog plina nastaju dimni plinovi koji se prije ispuštanja u atmosferu moraju pročistiti, slično kao i kod konvencionalnih tehnologija. Emisije i onečišćenje okoliša prvenstveno ovise o odabiru sustava za čišćenje dimnih plinova i podliježu regulativi kao i sva ostala konvencionalna postrojenja s direktnim izgaranjem otpada. Uglavnom se smatra da se pročišćavanje dimnih plinova uspješno provodi i da tehnologija napreduje tempom koji joj nameće regulativa. Upotreba sintetskog plina omogućava bolju kontrolu izgaranja nego što je to slučaj kod izgaranja krutog goriva, čime se smanjuju emisije CO , NO_x , dioksina i količina negorivih čestica.

Kao što je ranije rečeno, sintetski plin se prije upotrebe u plinskom motoru i plinskoj turbini mora pročistiti. Također se mora pročistiti kada se sintetski plin koristi kao sirovina u kemijskoj industriji. U slučaju izgaranja u generatoru pare s parnom turbinom to ne mora biti slučaj, jer je generator pare manje osjetljiv od plinskog motora i plinske turbine. Međutim, mnogi sastojci otpada sadrže klor i druge opasne polutante koje je prije izgaranja potrebno odstraniti. Za pročišćavanje sintetskog plina najuspješniji je mokri postupak čišćenja s vrećastim filterima. Iako se ulažu veliki naponi i znatna sredstva, tehnologija za pročišćavanje sintetskog plina još uvijek nije dovoljno razvijena i predstavlja glavnu kočnicu bržem razvoju sustava rasplinjavanja

krutog goriva, pa tako i otpada, koji je zbog raznolikosti sastava i potencijalno opasnih tvari u sastavu još veći problem od npr. ugljena.

U usporedbi s direktnim izgaranjem, tehnologija rasplinjavanja otpada ima sljedeće karakteristike [6]:

- zbog nižih temperatura reakcija, metali sadržani u otpadu (npr. čelik, bakar, aluminij ili mjed) nisu sinterirani, oksidirani ili rastaljeni, pa se mogu lakše izdvojiti iz pepela/materijala sloja te time imaju veću vrijednost za reciklažu;
- u procesu nastaje sintetski plin koji ima znatnu ogrjevnu vrijednost i kemijski potencijal, a koji se može koristiti u različitim postupcima energetske ili materijalne oporabe (npr. izgaranje, proizvodnja metanola);
- sintetski plin se u posebnim uvjetima izgaranja može uporabiti za taljenje pepela (vitifikacija), pri čemu nastaje inertni ostatak koji nije podložan ispiranju;
- odvajanje faza rasplinjavanja i izgaranja može doprinijeti boljoj kontroli procesa i rezultirati stabilnijim ukupnim procesom izgaranja;
- zbog manje količine (volumena) dimnih plinova (uslijed nižih faktora pretička zraka odnosno manje količine zraka potrebnog za reakcije) olakšano je čišćenje dimnih plinova.

U slučaju rasplinjavanja u fluidiziranom sloju, otpad se mora usitniti u manje komade, što predstavlja gubitak energije i čini sustav dobave goriva složenijim. Ali, zbog toga je moguća upotreba nekih od primarnih mjera pročišćavanja (u fazi izgaranja), stvara se manje pepela na dnu u odnosu na izgaranje na rešetki a i čestice pepela su krupnije. S druge strane više se odnosi pepela s dimnim plinovima, što postavlja više zahtjeve na čišćenje pepela.

Pročišćavanjem sintetskog plina, bez obzira da li radi se o mokrom ili suhom postupku, ostaju katran i još neki polutanti koje je potrebno zbrinuti. Katran ima određenu ogrjevnu vrijednost, pa se može koristiti kao gorivo u drugim industrijskim procesima. Prije korištenja potrebno je napraviti analizu sastava zbog potencijalno štetnih sastojaka koji se mogu nalaziti u katranu.

Kruti ostatak

Kruti ostatak nastao rasplinjavanjem odnosi se najviše na pepeo i čađu. Dijeli se na ostatak nastao rasplinjavanjem, te onaj koji se izdvoji u sustavu za čišćenje sintetskog plina i sustavu za čišćenje dimnih plinova. Zbog velike koncentracije teških metala ostatak nastao čišćenjem gorivog plina i dimnih plinova odlaze se na odlagališta, dok se ostatak iz rasplinjača može koristiti za gnojenje ili odlagati na posebna odlagališta (eng. *Sanitary landfill*).

Kruti ostatak se često koristi u industriji, pri proizvodnji betona u niskogradnji ili cementnoj industriji.

Otpadne vode

U procesu rasplinjavanja otpadne vode nastaju prilikom hlađenja i postupka mokrog čišćenja sintetskog plina, sadržavajući mnoge topive i netopive polutante, kao što su octena kiselina, sumpor, fenoli i drugi oksigenirani organski spojevi. Katran je najvažniji netopivi polutant. Postupak mokrog čišćenja proizvodi oko 0,5 kg tekućeg otpada po m_n^3 tretiranog sintetskog plina. Ukoliko se postupak mokrog čišćenja koristi i za uklanjanje katrana, tekući otpad mora proći skupi postupak čišćenja koji se vrši neutralizacijom i kemijskom precipitacijom, zbog problema s niskim vrijednostima pH i visokom koncentracijom soli.

Zbog složenosti procesa čišćenja i zbrinjavanja otpada nastalog čišćenjem današnji trend je razvoj sustava koji ne bi proizvodio tekući otpad, međutim to je moguće samo za otpad koji ne sadrži mnogo toksičnih, štetnih tvari.

Jedan od mnogo mogućih načina organizacije sustava za čišćenje katrana iz otpadnih voda [10]:

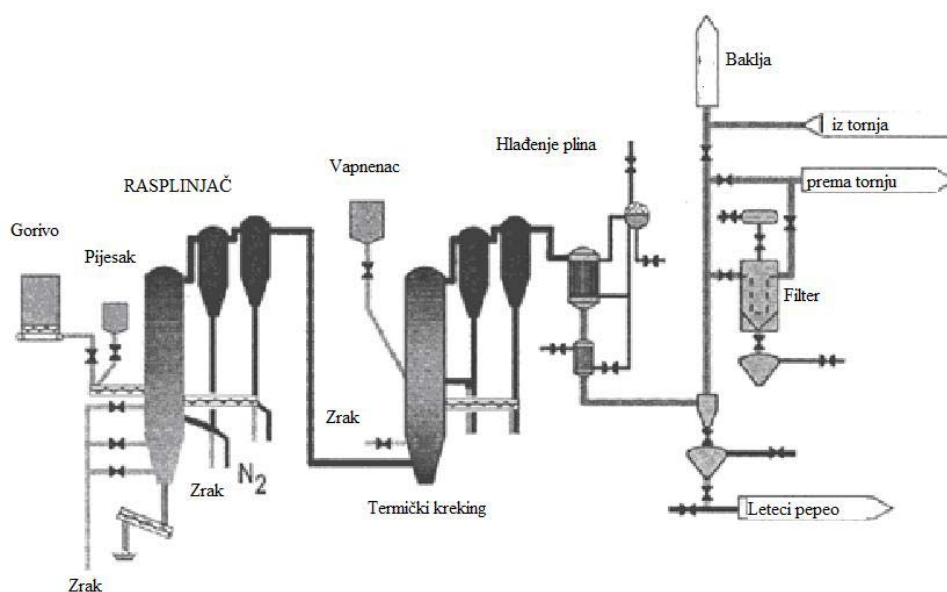
- odvajanje sumpora postupkom taloženja pomoću dodavanja soli sumporne kiseline – dodavanje željeznog sulfata,
- povrat sumpora i praha filtracijom,
- odlaganje filterskog kolača,
- otplinjavanje plinova otopljenih u vodi i većeg dijela ugljikovodika,

- djelomično isparavanje vode i njeno korištenje kao nadoknadne vode u pročištaču sintetskog plina,
- odmuljivanje isparivača i vođenje na konvencionalni biološki tretman,
- sol koja se izlučuje ne smatra se zagađivačem i može se odložiti na odlagalištu,
- ugljikovodici i ostali odstranjeni plinovi se spaljuju da bi se iskoristila njihova ogrjevna moć.

3.5. Međunarodna iskustva

Međunarodna iskustva s postrojenjima za rasplinjavanje komunalnog otpada nisu brojna, što govori o tome da se tehnologija još uvijek nalazi u razvoju i da nije dosegla razinu raspoloživosti koja je potrebna za širu komercijalnu upotrebu. Uglavnom se radi o postrojenjima koja se temelje na rasplinjaču s cirkulirajućim fluidiziranim slojem.

Slika 3.3. prikazuje postrojenje proizvođača *TPS Termiska*. Za svoj rad postrojenje koristi gorivo iz otpada. Rasplinjavanje se odvija u cirkulirajućem fluidiziranom sloju, a dobiveni sintetski plin se koristi kao gorivo za proizvodnju električne energije. U sklopu postrojenja nalazi se i sustav za čišćenje dimnih plinova.

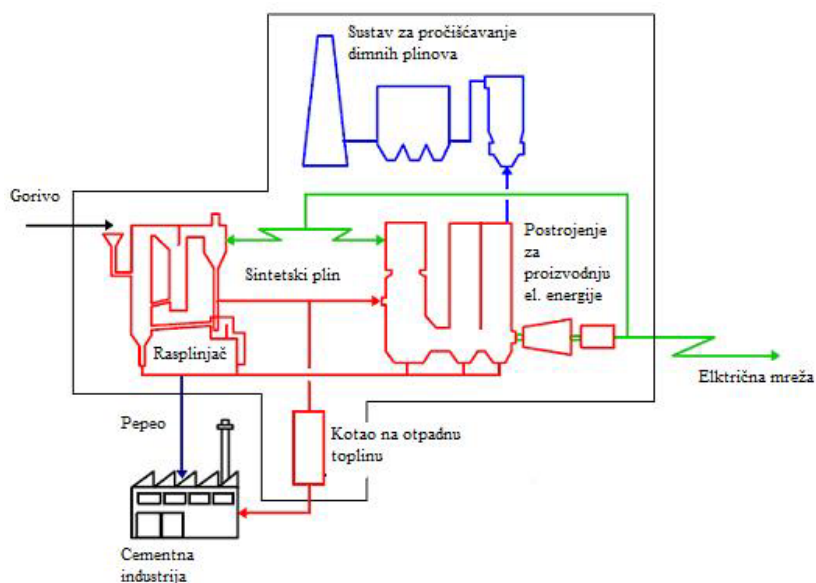


Slika 3.3. Proces rasplinjavanja i čišćenja sintetskog plina tvrtke *TPS Termiska* [11]

Jedno od takvih postrojenja nalazi se u Italiji u mjestu Greve-in-Chianti, a u pogonu je od 1993. godine. Postrojenje za svoj rad koristi pelete goriva iz otpada (RDF) donje ogrjevne vrijednosti 17,2 MJ/kg, koje se sastoji od 60 % papira i 40 % plastike. Peleti RDF-a su promjera 10-15 mm i maksimalne duljine 150 mm. Oni se pomoću pužnog vijka ubacuju u dva rasplinjača s cirkulirajućim fluidiziranim slojem tvrtke *TPS*, svaki kapaciteta 15 MW_{th} što je ukupno ekvivalentno 75.000 tona peleta RDF-a godišnje. Rasplinjači rade pri atmosferskom tlaku i temperaturi od oko 850 °C, a kao medij za rasplinjavanje i fluidizaciju koristi se zrak.

U sklopu postrojenja nalazi se dvo-stupanjski sustav uklanjanja krutih čestica, nakon kojeg plin odlazi na izgaranje ili se kao ohlađeni plin temperature 400 °C bez čišćenja vodi u obližnju cementaru. U cementari se sintetski plin koristi kao gorivo u pećima umjesto prirodnog plina. Donja ogrjevna vrijednost sintetskog plina je oko 7,5 MJ/Nm³.

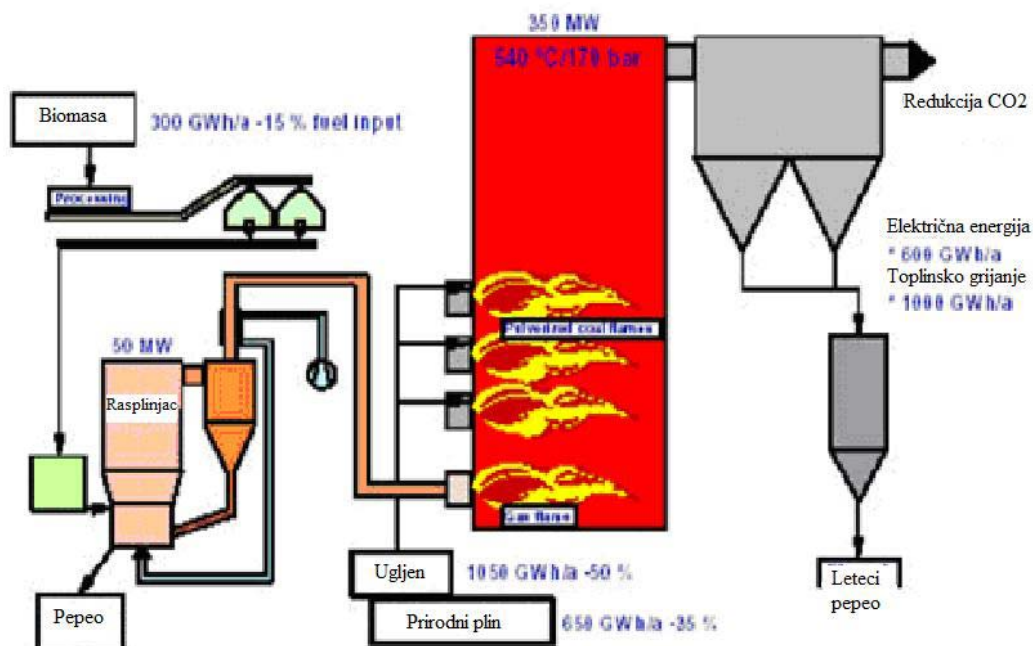
Nakon čišćenja sintetski se plin vodi u generator pare koji proizvodi paru za kondenzacijsku parnu turbinu (električne) snage 6,7 MW_e. Taj generator pare, kao i plamenici, posebno su projektirani da se dimni plinovi zadrže barem 2 sekunde kako bi se uništile potencijalno opasne tvari.



Slika 3.4. TPS proces u Grève-in-Chianti

Prije ispuštanja u atmosferu putem dimnjaka, dimni plinovi nakon izgaranja u kotlu prolaze postupak čišćenja pri čemu se u tro-stupanjskom apsorberu (suhi postupak) uklanjaju čestice, kiseli plinovi i teški metali, nakon čega odlaze na vrećasti filter.

Drugi proizvođač koji će se navesti je *Foster Wheeler*. Isto kao i *TPS Termiska*, proizvodi rasplinjače s fluidiziranim slojem kapaciteta 15-120 MW_{th}, što odgovara 25-50.000 t/god, ovisno o karakteristikama goriva. Najstarije postrojenje ovog proizvođača datira iz 1998. godine, a bazira se na tehnologiji rasplinjavanja s cirkulirajućim fluidiziranim slojem. Kao gorivo u procesu se koristi RDF. Kao i kod rasplinjača proizvođača *TPS Termiska* proces se odvija pri atmosferskom tlaku, te se zrak koristi kao medij za rasplinjavanje i fluidizaciju. Dobiveni sintetski plin upotrebljava se u termoelektrani ili industrijskom procesu. Na slici 3.5. nalazi se najvažnije referentno postrojenje proizvođača *Foster Wheeler* kapaciteta 40-70 MW_{th} koje se nalazi se u Lahtiju u Finskoj. Za svoj rad troši 80.000-100.000 t/god mješavine otpadne biomase, uglavnom drvene poput piljevine, iverja, kore i otpadnog drveta i RDF-a čiji se udio u smjesi kreće do 30 %, maseno, a koje se sastoji od plastike, papira i kartona.



Slika 3.5. Skica postrojenja u Lahtiju, Finska

Kao što je već navedeno, u postrojenju se RDF rasplinjava u rasplinjaču s cirkulirajućim fluidiziranim slojem, snage 50-60 MW_{th}. Dobiveni sintetski plin se ne koristi samostalno, već se suspaljuje s ugljenom i prirodnim plinom u generatoru pare snage 350 MW_{th}, koji se nalazi u sklopu konvencionalne kogeneracijske termoelektrane-toplane. Kogeneracijsko postrojenje proizvodi 167 MW_e električne snage i 240 MW_{th} topline za daljinsko grijanje, a u procesu sintetski plin nadomješta 15 % primarnog fosilnog goriva.

Gorivo je pripremljeno u obliku čestica manjih od 50 mm a tipično sadrži 20-60 % vlage, 40-80 % gorivih tvari i 1-2 % pepela. Rasplinjač radi na temperaturama 800-1000 °C, zavisno od karakteristika goriva. Prosječna iskoristivost rasplinjača kreće se oko 92 %.

Za gorivo ogrjevnice moći 10,3 MJ/kg i sadržaja vlage 32,8 %, proizveden sintetski plin ima sljedeći sastav:

Tablica 3.2. Sastav sintetskog plina dobivenog u Lahtiju, Finska

Tvar	Udio %
CO	9,6
CO ₂	12,3
CH ₄	3,3
H ₂	6,7
H ₂ O	35
N ₂	33,05
Ostalo	u tragovima

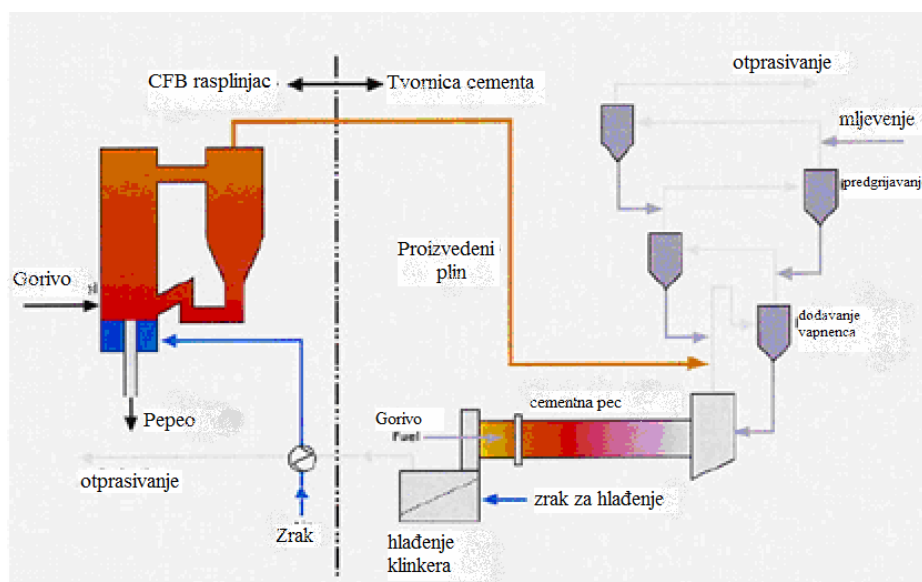
Vrući sintetski plin se podvrgava samo jednostavnom čišćenju u ciklonu, dok ukupni dimni plinovi nastali izgaranjem smjese različitih goriva u ložištu generatora pare prolaze klasični postupak čišćenja.

Pijesak i vapnenac koji se koriste kao materijal sloja te određena manja količina metalnih komadića i betona kao i drugih materijala izdvaja se na dnu rasplinjača kao pepeo. Sadržaj ugljika je manji od 0,5 % dok je razina klora zanemariva. U pepelu se nalaze i teški metali u tragovima, međutim njihova topivost je mala. Ta količina pepela koja se izdvoji na dnu rasplinjača čini samo manji dio ukupnog pepela glavnog generatora pare (3-5 %). Koncentracije neizgorenog ugljika i alkalnih spojeva ostaju

nepromijenjene, dok su se razine teških metala neznatno povećale, zavisno od vrste otpada koji se koristi. Nisu zabilježene promjene kod emisija organskih spojeva, poput dioksina. Ispitivanja topivosti pepela su pokazala zadovoljavajuće rezultate tako da termoelektrana ima dozvolu korištenja pepela kao i ranije, prije dodavanja rasplinjača otpada.

Slika 3.6. prikazuje primjer treće tvrtke proizvođača rasplinjača, a to je tvrtka *Lurgi*. Postrojenje se nalazi u Rüdersdorfu u Njemačkoj, te isto kao i dva primjera već navedenih tvrtki koristi rasplinjavanje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju. Koristi se 19 različitih tipova RDF-a, međutim sustav dobave goriva može istovremeno raditi s najviše četiri različite vrste goriva pri čemu se otpad ubacuje mehanički ili koristeći zrak, već zavisno od vrste goriva.

Postrojenje u Rudersdorfu proizvodi sintetski plin i čađu za upotrebu u rotacijskoj peći za proizvodnju cementa. Sintetski plin iz procesa spaljuje se u kalcinatoru susjedne cementare. Pepeo koji se odvodi iz procesa se prvo hladi a zatim transportira u mlin postrojenja za proizvodnju cementa.



Slika 3.6. Shema procesa u Rüdersdorfu, Njemačka

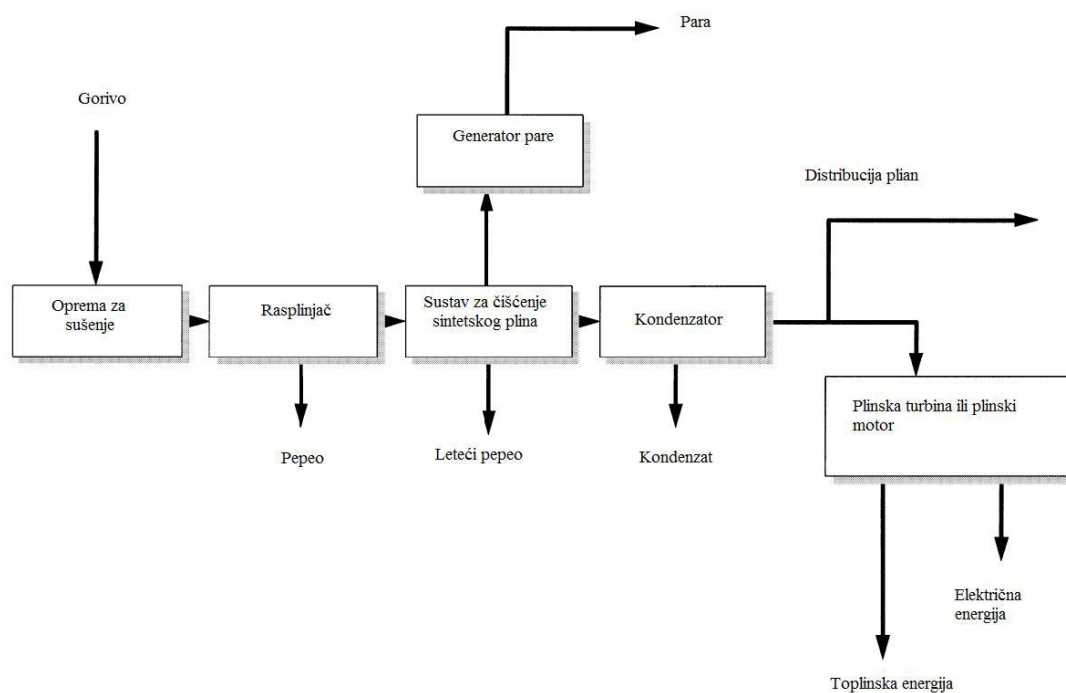
Navest će se i drugi primjer postrojenja tvrtke *Lurgi*. To je postrojenje, bazirano na rasplinjaču *British Gas – Lurgi*, a nalazi se u sklopu Schwarze Pumpe u Njemačkoj. Za razliku od već navedenih primjera, u ovom postrojenju rasplinjavanje se odvija u

fiksnom sloju. Postrojenje proizvodi sintetski plin koji se dobiva iz mješavine ugljena i otpada (RDF i proizvodni otpad). Sintetski plin je srednje kalorijske vrijednosti a koristi se kao sirovina za kemijsku industriju, u proizvodnji metanola, ili kao gorivo u generatorima pare i plinskim turbinama kombiniranog ciklusa, u svrhu proizvodnje električne energije. Postrojenje koristi rasplinjavanje u fiksnom sloju pri čemu je strujanje medija za rasplinjavanje, u ovom slučaju kisika i pare, prema gore. Kruti ostaci odvođeni se u rastaljenom stanju u obliku šljake. Kao negativna strana ovakvog postupka javlja se upotreba kisika kao sredstva za rasplinjavanje, budući se javlja potreba za postojanjem posebnog postrojenja za separaciju zraka iz kojeg će se kisik proizvoditi.

4. POSTROJENJA ZA ENERGETSKU OPORABU KOMUNALNOG OTPADA RASPLINJAVANJEM

Postrojenje za energetske uporabu komunalnog otpada sastoji se od elemenata:

- rasplinjača
- sustava za pročišćavanje sintetskog plina
- postrojenja za dobivanje električne i toplinske energije



Slika 4.1. Prikaz postrojenja za energetske uporabu komunalnog otpada [12]

4.1. Sustav za rasplinjavanje

Sustav za rasplinjavanje se sastoji od rasplinjača, spremnika otpada i opreme kojom se otpad dobavlja u rasplinjač. Jasno, najvažniji dio je rasplinjač. U ovom će se poglavlju pobliže opisati podjela rasplinjača, prikazati osnovne dijelove i izvedbe, te pobrojati pozitivne odnosno negativne strane.

Rasplinjač je reaktor u kojem se odvija proces pretvorbe ulaznog materijala, u ovom slučaju komunalnog otpada u plinovito gorivo, sintetski plin.

Prva podjela rasplinjača odnosit će se na teorijsku podjelu, po kojoj su rasplinjači svrstani u odnosu na smjer dodavanja goriva i smjera strujanja dobivenog plina. Tako razlikujemo tri tipa rasplinjača:

- istosmjerni,
- protusmjerni,
- unakrsni.

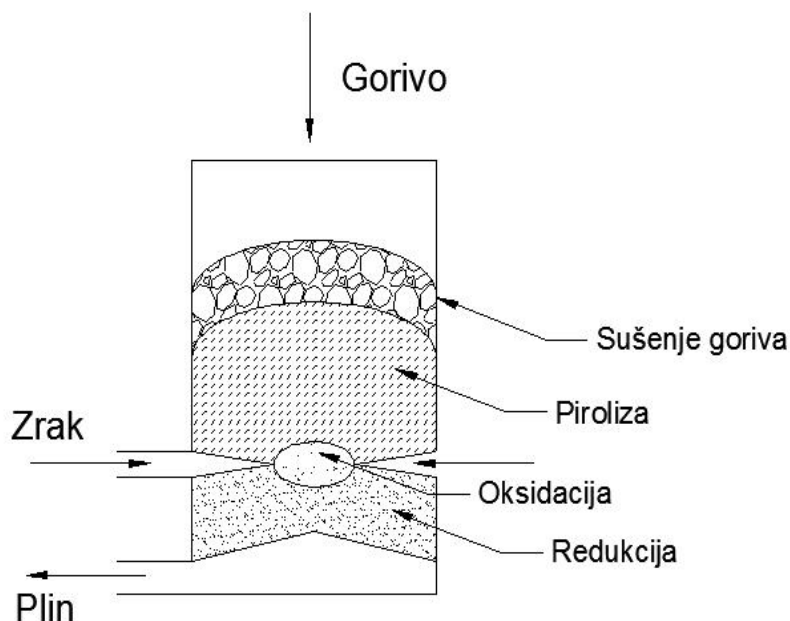
Druga podjela odnosit će se na različite izvedbe koje se koriste u komercijalne svrhe i oni se razlikuju prema izvedbi, a dijele se na:

- rasplinjavanje u fiksnom sloju,
- rasplinjavanje u fluidiziranom sloju.

4.1.1. Teorijska podjela rasplinjača

4.1.1.1. Istosmjerni rasplinjač

Kao što mu i ime kaže istosmjerni tip rasplinjača dobio je takav naziv jer u generatoru gorivo i plin imaju isti smjer. Razvijen je radi potrebe za dobivanjem čisteg plina u odnosu na protusmjernu vrstu rasplinjača. Kod ovog tipa rasplinjača zrak za rasplinjavanje se uvodi iznad ili u zoni oksidacije goriva, dok se plin ispušta na dnu generatora. Gorivo se uvodi u gornje hladnije dijelove generatora te se polako i ne reagirajući zagrijava. Paljenje goriva počinje tek u području pregrijane površine goriva, gdje je temperatura dovoljno visoka za početak reakcije. Temperatura zapaljenja postiže se zračenjem donjih užarenih slojeva.



Slika 4.2. Istosmjerni rasplinjač [8]

Katran i kiseline, produkti pirolize goriva, moraju proći kroz užareni sloj otpada gdje se prevode u vodik, ugljikov dioksid, ugljikov monoksid i metan. Ovisno o temperaturi u tom sloju i o vremenu provedenom u oksidacijskom sloju može se postići potpuni raspad katrana u plin. Mogućnost dobivanja gotovo potpuno čistog plina od katrana je najveća prednost istosmjernog tipa rasplinjača. Dobiveni plin se može koristiti bez naknadnog pročišćavanja u motorima s unutrašnjim izgaranjem.

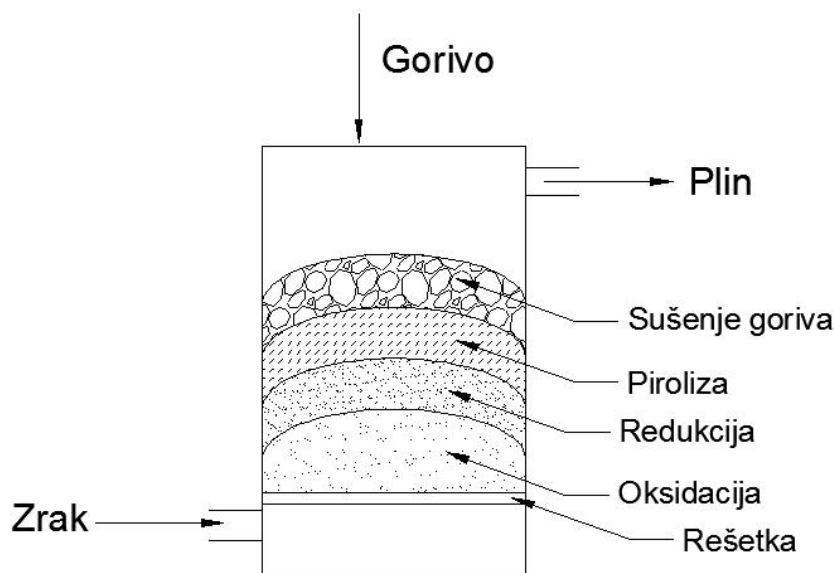
Najveća mana ovog tipa rasplinjača leži u nemogućnosti korištenja niza vrsta goriva bez prijašnje obrade. Goriva s malom nasipnom gustoćom dovode do problema s protokom i do povećanog pada tlaka, zbog toga što plin prolazi kroz gorivo, tako da ta goriva moraju biti peletizirana ili briketizirana prije upotrebe. Također, istosmjerni rasplinjači imaju više problema s gorivima s velikim udjelom pepela nego protusmjerni, što dovodi do taloženja pepela.

Istosmjerni rasplinjači imaju nešto slabiju toplinsku efikasnost budući da nema unutarnje izmjene topline između plina i goriva, pa zbog toga plin izlazi iz rasplinjača s relativno visokom temperaturom dok dobiveni plin ima obično nižu ogrjevnu vrijednost. Kod istosmjernih se rasplinjača postižu niže temperature nego što je to moguće kod drugih generatora, te se treba obratiti pažnju na nepovoljan utjecaj nižih

temperatura na brzinu reakcije, a time i na kvalitetu plina, pogotovo, ako se temperatura kreće oko granice reaktivnosti goriva.

4.1.1.2. Protusmjerni rasplinjač

Najstariji i najjednostavniji tip rasplinjača je protusmjerni prikazan na slici 4.3. Gorivo se dodaje na vrhu rasplinjača, dok se zrak uvodi na dnu. Generirani plin tako mijenja temperaturu od niske na ulazu-temperature zraka, koji se tada zagrijava prema najvišoj temperaturi na granici zone izgaranja i rasplinjavanja, da bi se prema izlazu ponovo smanjivala, budući se toplina plina odvodi hladnim gorivom.



Slika 4.3. Protusmjerni rasplinjač [8]

Na dnu, kod rešetke, nalazi se zona izgaranja, a iznad nje zona redukcije. U gornjem dijelu rasplinjača odvija se zagrijavanje i piroliza goriva, kao rezultat prijenosa topline prisilnom konvekcijom i zračenjem iz donjih slojeva. Katran i hlapljivi spojevi nastali u ovom dijelu bivaju odnošeni strujom plina, dok se pepeo nakuplja na dnu. Najveća prednost protusmjernog rasplinjača je njegova jednostavnost i unutarnja izmjena topline između plina i goriva, što dovodi do relativno niske izlazne temperature dobivenog plina, dakle nije potrebno njegovo dodatno hlađenje izvan generatora. Ovo

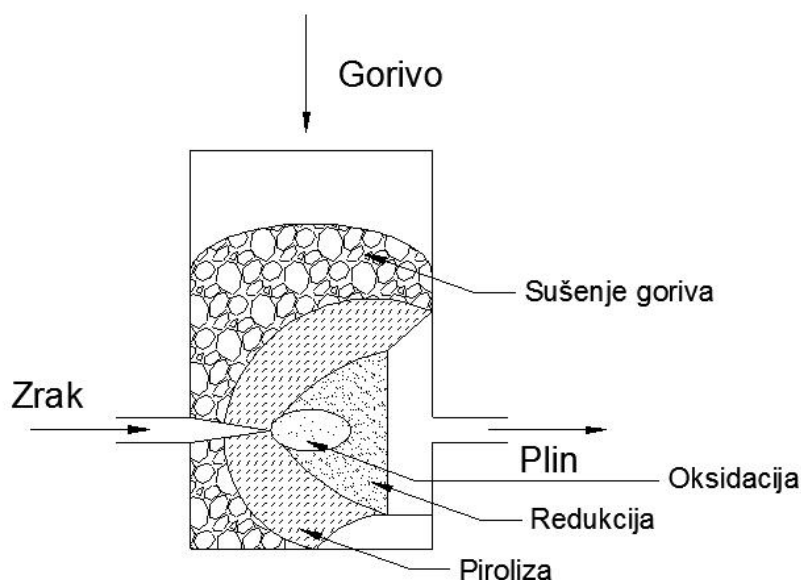
doprinosi visokoj toplinskoj efikasnosti ovakvog tipa rasplinjača, koji ujedno može koristiti širok raspon kvalitete goriva.

Najveći nedostaci ovog tipa su mogućnost pojave kanala u slojevima, što može dovesti do prolaska kisika kroz različite slojeve, te posljedično, i eksplozije. Zbog ovih nedostataka postoji potreba za ugradnjom mehanizma za trešnju rešetke radi sprečavanja stvaranja kanala kroz slojeve. Također, zbog visokog udjela katrana u dobivenom plinu potreban je složeniji sustav za čišćenje plina u slučaju korištenja plina u motorima s unutrašnjim izgaranjem.

Temperatura reakcije kod protusmjernih rasplinjača znatno je veća od temperature kod istosmjernih, te razlika može biti i do 300 °C [13], što treba imati u vidu zbog teškoća koje se znaju javljati u stvarnom pogonu s troškom, zbog niskog tališta.

4.1.1.3. Unakrsni rasplinjač

Unakrsni tip rasplinjača je razvijen za korištenje s drvenim ugljenom kao gorivom. Korištenje drvenog ugljena kao goriva rezultira visokom temperaturom (1500 °C) u oksidacijskoj zoni, što može dovesti do problema s materijalom stijenke kod ostalih tipova rasplinjača. U unakrsnom tipu rasplinjača kao toplinski izolator od visokih temperatura služi samo gorivo tj. drveni ugljen.



Slika 4.4. Unakrsni plinski generator [8]

Prednost ovog tipa rasplinjača leži u mogućnosti postizanja veoma malih snaga, odnosno radu pri niskim opterećenjima. Nedostatak je mala mogućnost pretvorbe katrana u ovom tipu rasplinjača.

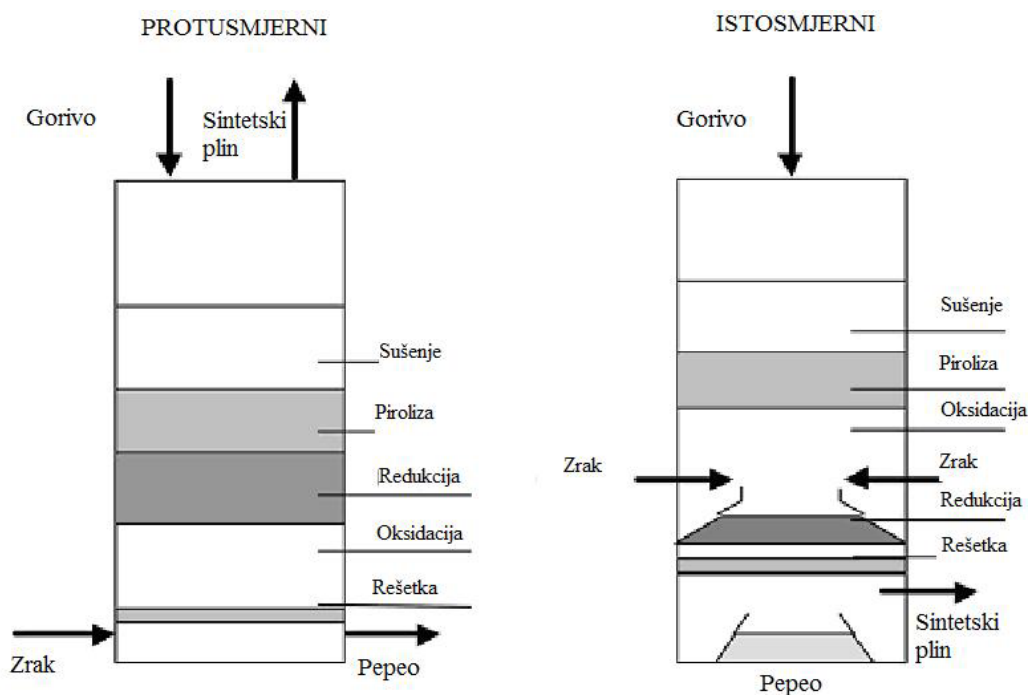
4.1.2 Izvedbena podjela rasplinjača

4.1.2.1. Rasplinjavanje u fiksnom sloju

Vertikalni rasplinjači u kojima se odvija rasplinjavanje u fiksnom odnosno krutom sloju (eng. VFB) najznačajniji su predstavnici ove grupe. Dije se na protusmjerne (eng. updraft) i istosmjerne (eng. downdraft), kao što prikazuje slika 4.5.

Kao što je objašnjeno u gore navedenoj podjeli, kod protusmjernih rasplinjača, materijal koji se rasplinjava se dodaje na vrhu rasplinjača, dok zrak ulazi s dna. Materijal se rasplinjava u kretanju prema donjem dijelu rasplinjača. Kao što se vidi iz slike, faze odvijanja procesa kreću se od sušenja, pirolize, redukcije do oksidacije. Najviša temperatura je u zoni oksidacije i kreće se oko i iznad 1200 °C. Kao posljedica ovakvog kretanja materijala koji se rasplinjava i sintetskog plina, katran iz faze pirolize odlazi s plinom, te se dobiva sintetski plin s velikim sadržajem katrana. Dobra strana protusmjernog rasplinjača je jako dobra izmjena topline unutar reaktora, budući se sintetski plin hladi u kretanju prema vrhu rasplinjača, a predaje toplinu hladnom materijalu koji tek ulazi u rasplinjač.

Kod istosmjernih rasplinjača, materijal se dodaje na vrhu rasplinjača, dok zrak ulazi sa strane, iznad rešetke, a dobiveni sintetski plin izlazi iz rasplinjača ispod rešetke. Zbog ovakve konfiguracije, pare nastale procesom pirolize omogućavaju učinkovit termički kreking katrana. Međutim, unutarnja izmjena topline nije tako dobra kao kod protusmjernih rasplinjača.



Slika 4.5. Podjela VFB rasplinjača

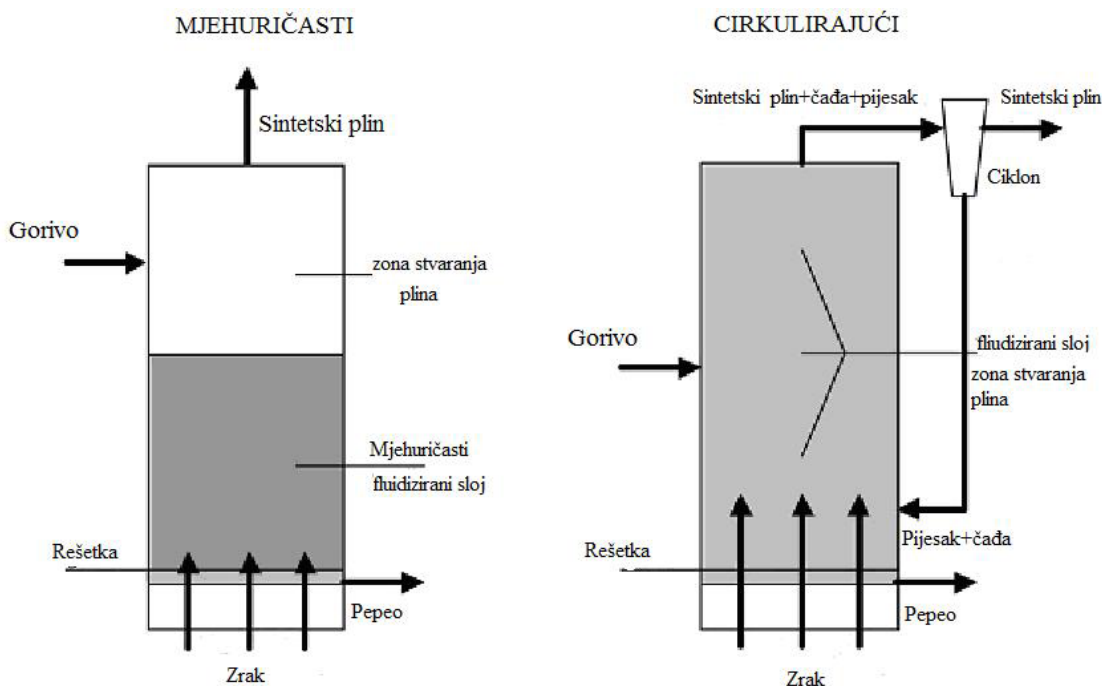
4.1.2.2. Rasplinjač s fluidiziranim slojem

Fluidizirani sloj je termin za proces u kojem se kruti sloj, sačinjen od finih čestica, kao što je kvarcni pijesak, transformira u fluidizirani sloj zbog kontakta sa strujom zraka ili nekog fluidizirajućeg medija koji nastrujava s dna rasplinjača. Rasplinjači s fluidiziranim slojem su prvenstveno razvijeni kako bi riješili probleme taloženja pepela koji se javljaju kod rasplinjavanja u krutom sloju, te kako bi se povećala efikasnost rasplinjača.

Istosmjerni i protusmjerni tip rasplinjača imaju kao nedostatak zahtjeve na morfološka, fizička i kemijska svojstva goriva. Neudovoljavanje tim zahtjevima na karakteristike goriva dovodi do problema s protokom goriva, taloženjem pepela i velikim padovima tlaka unutar rasplinjača protustrujnog i istosmjernog tipa. Zbog ovih nedostataka je razvijen tip rasplinjača s fluidiziranim slojem.

Kod rasplinjavanja u fluidiziranom sloju ne postoje faze rasplinjavanja kao što je to slučaj kod drugih rasplinjača, već se proces odvija u izotermičkom sloju, odnosno, temperatura je skoro svuda jednaka i kreće se od oko 700 °C do 900 °C, što je niže

nego kod rasplinjavanja u krutom sloju. Rasplinjače s fluidiziranim slojem dijelimo na rasplinjače s mjehuričastim slojem (eng. Bubbling Fluidised Bed, BFB) i cirkulirajućim slojem (Circulating Fluidised Bed, CFB), koji su prikazani na slici 4.6..



Slika 4.6. Podjela rasplinjača s fluidiziranim slojem

Kod BFB rasplinjača, brzina strujanja zraka, odnosno fluidizirajućeg medija za rasplinjavanje, kreće se od 1-3 m/s, te inertni sloj postoji samo u donjem dijelu rasplinjača. Upravo zbog tako male brzine strujanja kvarcni pijesak ili čađa ne izlaze iz rasplinjača.

Suprotno tome, kod CFB rasplinjača brzina strujanja je puno veća i kreće se od 5 do 10 m/s. Zbog toga se sloj u kojem se odvija rasplinjavanje prostire čitavim rasplinjačem, a pijesak i čađa odlaze zajedno sa sintetskim plinom iz rasplinjača. Zato CFB rasplinjači sadrže zračni ciklon u kojem se odvajaju čestice čađe i pijeska, te se pijesak vraća u rasplinjač, gdje čini fluidizirani sloj, dok se čađa uklanja.

Najveća prednost ovog tipa rasplinjača leži u fleksibilnosti u odnosu na vrstu i tip korištenog goriva. To je rezultat jednostavne regulacije temperature unutar rasplinjača, koja se može držati ispod temperature taljenja pepela. Postoji mogućnost korištenja goriva male gustoće bez potrebe prethodne obrade. Nedostatak je u povećanom udjelu

katrana u dobivenom plinu, nepotpunom izgaranju ugljika i sporom odazivu na promjenu opterećenja. Ove vrste rasplinjača se koriste u aplikacijama koje zahtijevaju veće snage.

Tablica 4.1. Usporedba različitih tipova rasplinjača [10]

Karakteristike	Rasplinjavanje u krutom sloju		Rasplinjavanje u fluidiziranom sloju	
	Protusmjerni	Istosmjerni	Mjehurićasti	Cirkulirajući
Pretvorba ugljika	****	****	**	****
Termička iskoristivost	*****	****	***	****
Oprema za puštanje u pogon	*	*	***	***
Kontrolna oprema	**	**	****	****
Mogućnost povećanja kapaciteta	***	*	***	*****
Elastičnost ulazne količine	****	*	**	**
Količina pepela	*	*	****	****
Pojava sinteriranja	*	*	***	****
Miješanje	*	*	****	*****
Udio katrana	*	*****	**	***
Udio čestica	*****	***	***	**
Ogrjevna vrijednost sintetskog plina	*	*	*	**

* jako loše, ** loše, *** dobro, **** jako dobro, ***** odlično.

4.2. Sustav za pročišćavanje sintetskog plina

Sustav za pročišćavanje nije obavezan u postrojenju za energetske uporabu komunalnog otpada. On ovisi o načinu dobivanja električne i toplinske energije. Ukoliko sintetski plin nakon rasplinjača odlazi u generator pare, tada nije potrebno plin čistiti i zbog toga su ta postrojenja jednostavnija, a samim time i jeftinija. Kod takvih postrojenja nema bojazni da će se zbog različitih čestica ili elemenata u plinu oštetiti generator pare. Na drugoj strani su postrojenja s plinskim motorima ili plinskim turbinama, koji zbog iznimne osjetljivosti zahtijevaju posebno čišćenje sintetskog plina nakon rasplinjača.

Tablica 4.2 Potrebna kvaliteta sintetskog plina [10]

	Generator pare	Plinski motor	Plinska turbina
Ogrjevna vrijednost (MJ/m_n^3)	>4	>4	>4
Čestice (mg/m_n^3)	-	< 5 – 50	< 5 – 7
Katran (g/m_n^3)	-	< 0,5	< 0,1 - 0,5
Alkalni metali (ppm)	-	< 1 - 2	< 0,2 – 1

Pročišćavanje sintetskog plina donosi niz važnih stvari za postrojenje kao što su: mogućnost rada visoko iskoristivih plinskih turbina i motora, očuvanje materijala istih tih elemenata, smanjuje štetni utjecaj na okoliš, povećava ogrjevnu vrijednost sintetskog plina i čuva materijale sustava za iskorištavanje otpadne topline.

Tablica 4.3. Utjecaj određenih elemenata sintetskog plina [10]

Štetni sastojci	Prisutnost	Problemi
Čestice	Nastale iz pepela, čađe, inertni materijal iz fluidiziranog sloja	Pojava korozije metalnih elemenata i zagađenje okoliša
Alkalni metali	Iz alkalnih metala, posebno natrija i kalija, prisutnost u isparenoj fazi	Pojava visoko temperaturne korozije, skidaju zaštitni oksidni sloj metalnih elemenata
Dušik iz goriva	Uzrokuje potencijalne emisijske probleme formirajući NO_x za vrijeme izgaranja	Potencijalna opasnost od stvaranja NO_x ,
Sumpor i klor	U većini slučajeva se ne smatraju problematičnim	Velika onečišćenja i kisela korozija metala
Katran	Bitumensko ulje koje se sastoji od kompleksne mješavine oksidiranog ugljikovodika prisutno u parnoj fazi u proizvedenom plinu, teško se uklanja jednostavnom kondenzacijom	Začepljuje filtere i ventile, te stvara koroziju

Termički kreking (eng. *Thermal cracking*)

Katran nastao rasplinjavanjem otpada jako je stabilan i otporan na obradu termičkim krekingom. Potrebne temperature za termički kreking kreću se između 1000 i 1300 °C. Zbog tako visokih temperatura, nastoji se tu obradu provesti već u samom rasplinjaču. Kod rasplinjavanja u krutom sloju, dva su različita pristupa postizanja termičkog krekinga korištenje temperature sloja i povećanje reaktivnosti goriva kako bi se postiglo produljenje vremena pretvorbe.

Katalitički kreking (eng. *Catalytic cracking*)

Katalitički procesi za pretvorbu katrana trebaju temperaturu između 800 i 900 °C. Uspješnost uklanjanja katrana je od 90 do 95 %, a u tu svrhu se koristi vapnenac, budući je veoma djelotvoran a nije skup materijal. Na 1 m_n³ sintetskog plina, potrebno je oko 0,03 kg vapnenca [10]. Proces se može odvijati i u rasplinjaču s fluidiziranim slojem, u kojem je katalizator dodan u građu sloja, ili u posebnom reaktoru ispod rasplinjača. Kod prve opcije, za proces se koristi temperatura sloja, međutim to jako skraćuje životni vijek katalizatora. U slučaju posebnog reaktora, katalizator je zaštićen deaktivatorima, ali proces zahtjeva dodatni kisik radi oksidacije plina i povećanja temperature.

Parna pretvorba i pomak CO (eng. *Steam reforming and CO-shift*)

Promjena i obrnuta reakcija metanizacije omogućavaju povećanje koncentracije vodika u sintetskom plinu čak do 10 % putem pretvorbe metana i pare. Za pokretanje pretvorbenih reakcija koriste se katalizatori koji se aktiviraju pri niskim temperaturama.

Parna pretvorba i reakcija pomaka CO zahtijevaju preliminarno uklanjanje katrana, budući se katalizatori lako deaktiviraju ako je koncentracija katrana u sintetskom plinu veća od 2 g/m_n³.

Ispirni toranj (eng. *Scrubber or saturator*)

Ispirni tornjevi odnosno njihova posebna izvedba koja se naziva saturatori koriste se kao sustav kontrole katrana. Ispirni toranj se sastoji od dva zasebna tornja. U prvom se tornju sintetski plin dovodi u stanje zasićenja pomoću kapljica vode pri temperaturi od 40 do 80 °C. Temperatura i zasićenje vode omogućavaju katranu da kondenzira na kapljicama vode. U drugom tornju se ispiru te kapljice vode s kondenziranim katranom. Uobičajeno je koristiti ovlaženi sloj gusto ispunjen elementima čiji oblik omogućava veliku površinu između sintetskog plina i kapljica vode koje služe za ispiranje.

Vrećasti filter (eng. *Baghouse*)

Vrećasti filter je vrlo efikasna i dokazana tehnologija koja omogućuje odvajanje krutih čestica većih od 0,1 µm sa stupnjem odvajanja od 99 %.

Alkalni kondenzator (eng. *Alkali condenser*)

Alkalni metali kondenziraju na površini čestica pri temperaturi od 550 °C. Naposljetku, kada se sintetski plin ohladi do temperature od 550 °C, a čišćenje se odvija u vrećastom filteru, alkalni metali se uklanjaju zajedno s česticama.

Tablica 4.4. Prednosti i nedostaci sustava za uklanjanje katrana [10]

Proces	Prednost	Nedostatak
Termički kreking	Jednostavna kontrola	Gubitak ogrjevne vrijednosti
	Jeftin postupak	Gubitak iskoristivosti
Katalitički kreking	Jednaka ogrjevna vrijednost	Gubitak katalizatora
	Jednaka temperatura plina	Otežana kontrola
Ispirni toranj	Jednostavna kontrola	Gubitak ogrjevne vrijednosti
	Kontrolira se zagađenje zraka	Hlađenje sintetskog plina Proizvodnja otpadne vode

4.3. Postrojenje za dobivanje električne energije

Postoje tri glavna oblika postrojenja za dobivanje električne energije korištenjem sintetskog plina, a to su:

- generator pare,
- plinski motor,
- plinska turbina.

Kao što je već navedeno u prethodnom poglavlju ova tri koncepta postrojenja možemo podijeliti u dvije grupe. Prva grupa je jednostavnija i jeftinija izvedba postrojenja koja ne sadrži sustav za pročišćavanje sintetskog plina, i to je izvedba postrojenja s generatorom pare kao postrojenjem za dobivanje električne energije, a u drugu grupu spadaju plinski motor i plinska turbina.

4.3.1. Generator pare (parno postrojenje)

Kod ovakve izvedbe postrojenja za energetske oporabu komunalnog otpada, električna energija se dobiva na generatoru koji pogoni parna turbina. To je najjednostavnija konstrukcija postrojenja jer nema potrebe za sustavom za čišćenje sintetskog plina, budući katran izgara u generatoru pare i ne oštećuje ga. Nakon rasplinjavanja sintetski plin odlazi u generator pare, gdje izgara u struji zraka. Dobivena para pogoni parnu turbinu koja je povezana s električnim generatorom. Prosječna iskoristivost ovakvog tipa postrojenja je 20 %, što je bitno manje od drugih izvedbi, međutim upravo zbog izostanka sustava za pročišćavanje sintetskog plina, izvedba je jednostavna i jeftina, te se često investitori opredjeljuju za takvu izvedbu.

Ograničavajući faktor korištenja generatora pare je temperatura koja je u zoni cijevi pregrijača limitirana na 450 °C, kako ne bi došlo do pojave visoko-temperатурne korozije na cijevima izazvane klorovodikom, koji je često prisutan u dimnim plinovima. Manja temperatura znači i manju temperaturu pare na ulazu u parnu turbinu zbog čega je iskoristivost takvog postrojenja mala.

Ukoliko bi se ugradio sustav čišćenja sintetskog plina prije spaljivanja u generatoru pare, te iz njega izdvojio klorovodik, onda bi maksimalna temperatura pare mogla biti do 520 °C, što bi poboljšalo iskoristivost postrojenja na otprilike 24 %.

Jasno, nakon izgaranja u generatoru pare, dimni plinovi odlaze na pročišćavanje kako bi se postigle potrebne ekološke norme.

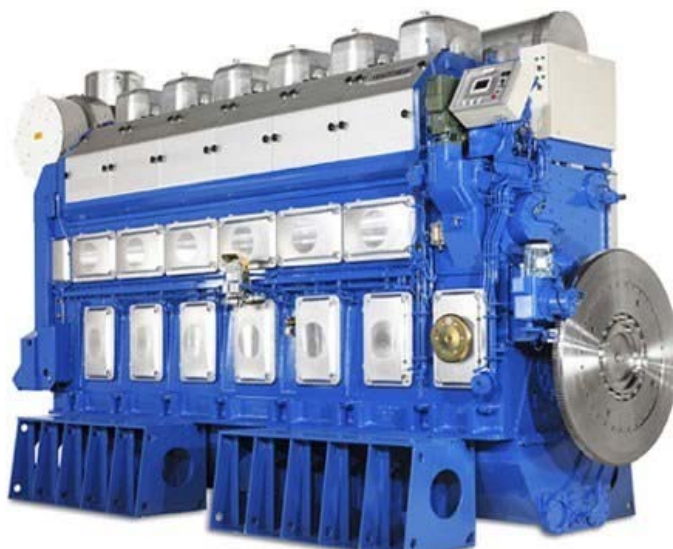
Sintetski plin za suspaljivanje (eng. Co-firing)

Često se sintetski plin dobiven rasplinjavanjem komunalnog otpada koristi u konvencionalnim postrojenjima za suspaljivanje, kao dodatno gorivo. Tako postoje izvedbe postrojenja u kojima, uz ugljen, u generatoru pare izgara sintetski plin dobiven rasplinjavanjem. Smatra se, da se time smanjuje negativan ekološki učinak što ga proizvodi konvencijalno postrojenje, kao što su emisije ugljikovog dioksida i sl.

Sintetski plin se koristi i kao dodatno gorivo u kombiniranim postrojenjima kod kojih služi za izgaranje u kotlu na otpadnu toplinu [10]. Električna iskoristivost takvog postrojenja dostiže vrijednost i preko 25 %. Značajno je da kod takvih postrojenja temperatura unutar parnih cijevi ne prelazi 180 °C, tako da ne dolazi do stvaranja korozije. Isto tako, takva postrojenja mogu raditi s komunalnim otpadom velike vlažnosti, zbog visokih temperatura koje se postižu, koje ne ovise o ogrjevnoj vrijednosti komunalnog otpada.

4.3.2. Plinski motor

Tehnologija rasplinjavanje ugljena i goriva koja sadrže ugljen i korištenje dobivenog plina u plinskim motorima primjenjuje se već više od pola stoljeća. Najvažnija stavka za korištenje ove kombinacije (rasplinjača i plinskog motora) s komunalnim otpadom kao gorivom je sustav za pročišćavanje sintetskog plina. Iz sintetskog plina moraju se ukloniti prašina, katran i alkalni metali, kao što je i navedeno u prethodnom poglavlju. Iskoristivost takvog postrojenja kreće se oko 25 %. Plinski motori nisu toliko osjetljivi kao što je to slučaj s plinskim turbina.

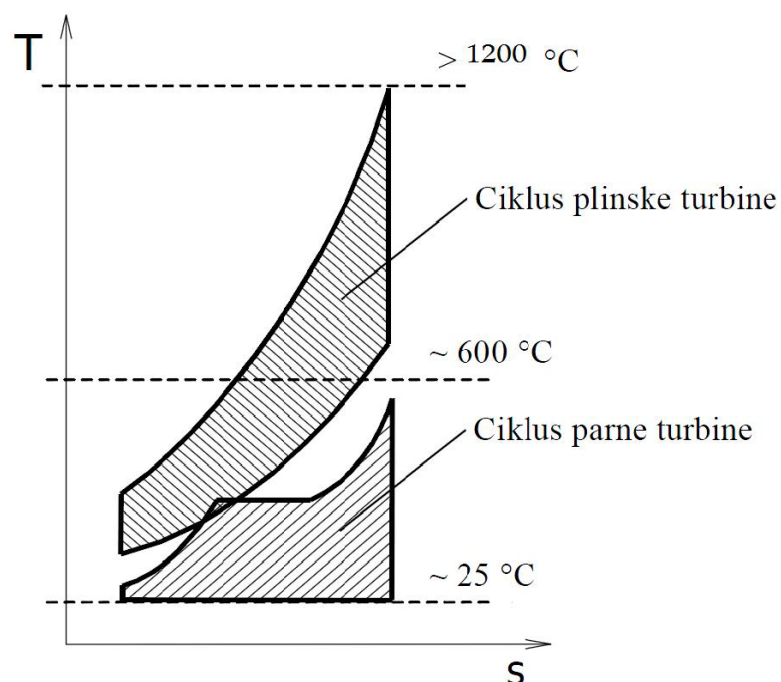


Slika 4.7. Plinski motor tvrtke Wärtsilä

Snage ovakvih postrojenja broje se u MW, tako da klasični plinski motori malih snaga ne dolaze u obzir. Proizvodnjom velikih plinskih motora bave se specijalizirane kompanije. To su veliki sporohodni motori s puno cilindara. Najpoznatije tvrtke koje se bave izradom tako snažnih motora su Wärtsilä iz Helsinkija [14], Finska, čiji su motori snaga do 16 MW i Caterpillar iz Peorije, USA, sa snagama motora do 5 MW. U ponudama kompanije Wärtsilä već imaju gotove blokove motora za energetska postrojenja. To su najčešće blokovi od po 3 motora, iako nude mogućnost individualne prilagodbe.

4.3.3 Plinska turbina (kombinirano postrojenje)

Treći način dobivanja električne energije je korištenjem plinske turbine. Plinska turbina kao samostalna cjelina nema veliku iskoristivost i zato se plinska turbina veže s parnom turbinom kao što prikazuje slika 4.8., te se takvo postrojenje zove kombinirano postrojenje (kombi proces, eng. *CCGT*).



Slika 4.8. Kombinirani ciklus

Nakon čišćenja sintetski plin ide u plinsko postrojenje, gdje izgara u komori izgaranja u smjesi sa zrakom. Nakon komore izgaranja, plin temperature oko $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ i tlaka oko 15 bara odlazi na plinsku turbinu te ekspandira do oko $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, nakon čega dimni plinovi odlaze u kotao na otpadnu toplinu (utilizator). Tamo se konvekcijom toplina sadržana u dimnim plinovima koristi za proizvodnju pare stanja $520\text{ }^{\circ}\text{C}$, koja zatim odlazi u parnu turbinu gdje ekspandira do stanja u kondenzatoru (okolišna temperatura).



Slika 4.9. Plinska turbina

Kombinirano postrojenje predstavlja najsuvremeniji i najučinkovitiji način za proizvodnju električne energije. Iskoristivost takvog postrojenja kreće se od oko 26 do 35 %.

Kao što tablica 4.2. prikazuje, najstroži uvjeti su upravo za korištenje plinske turbine. To je najosjetljiviji dio postrojenja i potrebno je zadovoljiti stroge kriterije kako bi se sintetski plin mogao nakon čišćenja dovesti u plinsku turbinu.

Plinske turbine koje se koriste u konvencionalnim postrojenjima s prirodnim plinom kao gorivom moraju se modificirati, budući sintetski plin ima izrazito malu ogrjevnu vrijednost. Za što lakše pokretanje turbina, mlaznice komore izgaranja moraju moći koristiti dvostruka goriva, a za što bolju kontrolu CO emisija, komore izgaranja moraju biti veće/dulje.

5. TEHNO-EKONOMSKI PRORAČUN POSTROJENJA ZA ENERGETSKU OPORABU KOMUNALNOG OTPADA

Kao ogledni primjer za analizu planiranog postrojenja uzeto je postojeće postrojenje u mjestu Greve in Chianti, blizu Firence. Radi se o suvremenom postrojenju za energetske oporabu komunalnog otpada temeljenom na rasplinjavanju, koje kao gorivo koristi gorivo iz otpada. Postrojenje u Italiji je konstruirano za zbrinjavanje 80.000 tona otpada godišnje, što je kapacitet manji od kapaciteta postrojenja koje će biti analizirano a koje iznosi 200.000 tona godišnje. Osnovni parametri planiranog postrojenja povećat će se proporcionalno parametrima postojećeg postrojenja. Zbog nedovoljnog iskustva s postrojenjima većeg kapaciteta i osiguranja bolje elastičnosti pogona, planirano postrojenje koje se analizira u ovom radu će imati dvije pogonske linije kapaciteta od po 100.000 t/g svaka.

U postojećem postrojenju nalaze se dva rasplinjača tvrtke Termiska Processer AB (TPS). To su rasplinjači s cirkulirajućim fluidiziranim slojem, koji koriste gorivo iz otpada (RDF). Sintetski plin proizveden u rasplinjačima izgara u generatoru pare, a dobivena para pogoni parnu turbinu. Iako nema potrebe za posebnim čišćenjem sintetskog plina za korištenje u ovakve svrhe, zbog buduće nadogradnje plinsko-turbinskog postrojenja, u postrojenje je uključen i sustav za pročišćavanje sintetskog plina.

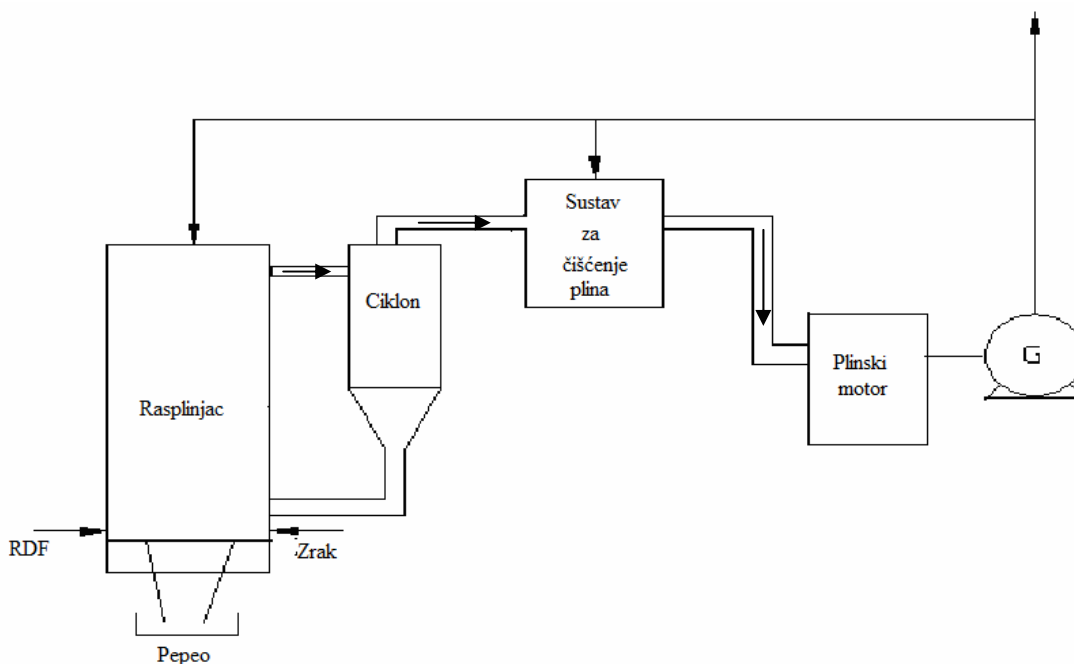
Pretpostavke

Važno je naglasiti kako nije jednostavno planirati takva postrojenja, zbog sljedećih razloga. Kao prvo, nije poznat stvarni trošak izgradnje energetskog postrojenja niti za konvencionalna postrojenja, pa tako niti za ovako relativno novu tehnologiju kao što je rasplinjavanje. Budući da niti jedno postrojenje nije jednako, ili na istoj lokaciji, troškovi se nikada točno ne mogu procijeniti, već se u ovakvim projektima pokušava što je moguće bolje predvidjeti razne troškove, ali i pretpostaviti potencijalne dodatne troškove.

Troškovi postrojenja za rasplinjavanje će se smanjivati s povećanjem broja postrojenja i kada se tehnologija još detaljnije ispita. Kako je razvoj tehnologija teško predvidjeti, nezahvalno je koristiti procjene istih. A uz to, moguće je odustajanje od upotrebe takve tehnologije, ukoliko se u par narednih godina pokaže da one nisu isplative.

Troškovi i dobit postrojenja su indikativne vrijednosti te se mogu koristiti kao ogledne veličine za izračunavanje isplativosti, međutim, takve vrijednosti nisu egzaktna, te će ovisiti o dobavljačima, veličini postrojenja, karakteristikama postrojenja, tehnologiji koja će se koristiti kao i o lokalnim faktorima.

5.1. Postrojenje s plinskim motorom

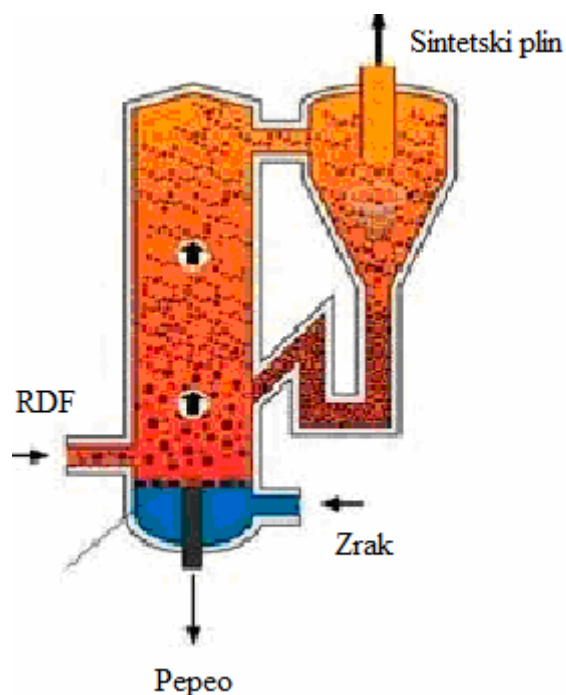


Slika 5.1. Shema analiziranog postrojenja

5.1.1. Rasplinjač

Gorivo iz otpada je mehanički pripremljen komunalni otpad. Mehanička obrada podrazumijeva usitnjavanje, odvajanje i sortiranje određenih materijala u otpadu. U

tablici 5.1. prikazane su karakteristike RDF-a koji se koristi u postrojenju Greve in Chianti.



Slika 5.2. Odabrani rasplinjač proizvođača TPS

Tablica 5.1. Karakteristike RDF-a [15]

Vrsta		Peleti		
Oblik		Cilindrični		
			Od	Do
Dimenzije		Promjer	mm	10
		Duljina		50
Nasipna gustoća		kg/m ³		700
Sastav	H ₂ O	% težinski		10
	Pepeo			16
	S			0,3
	Cl			0,8
Donja ogrjevna vrijednost		MJ/kg	21	
		kcal/kg	5500	
Temperatura taljenja pepela		°C		>1150
Teški metali (približna vrijednost)		Ph	mg/kg	150
		Cr		200
		Cu		100
		Zn		300
		Ni		20
		Cd		2
		Hg		1

Za planirano postrojenje odabran je rasplinjač s cirkulirajućim fluidiziranim slojem, sljedećih karakteristika:

Tablica 5.2. Karakteristike rasplinjača u planiranom postrojenju

Broj rasplinjača	n_R	2	
Tip rasplinjača		Cirkulirajući fluidizirani sloj	
Toplinski kapacitet		MW	55,56
Temperatura procesa		°C	850
Kapacitet RDF-a	\dot{m}_{RDF}	kg/h	13.320
Proizvodnja sintetskog plina	\dot{m}_g	m_n^3/h	31.111
Iskoristivost rasplinjača	η_R	%	70

U postojećem postrojenju u Greve in Chianti, koje služi kao referentno, instalirana su dva rasplinjača na temelju kojih se izračunavaju pojedine stavke važne za planirano postrojenje. Osim što je u analiziranom postrojenju kapacitet rasplinjača povećan kako bi zadovoljio zbrinjavanje 200.000 tona RDF-a godišnje, povećana je i iskoristivost samih rasplinjača. Zbog većeg kapaciteta samih rasplinjača smatra se da će njihova iskoristivost sa 65 %, kao što je slučaj kod rasplinjača u postojećem postrojenju u Italiji, porasti na 70 % u analiziranom postrojenju.

Na kraju procesa rasplinjavanja dobiva se sintetski plin sljedećih karakteristika:

Tablica 5.3. Karakteristike sintetskog plina [15]

			Od	Do
Temperatura	°C		800	900
Tlak	kPa		3	5
Sastav	H ₂	% volumski	7	9
	CO		9	13
	C _x H _y		6	9
	CO ₂		12	14
	N ₂		47	52
	H ₂ O		10	14
	Drugo		0,5	1
Donja ogrjevna vrijednost (H_{dg})		MJ/m _n ³	4,5	5,5
		kcal/m _n ³	1.100	1.300
Ukupna energetska vrijednost (na izlazu iz rasplinjača)		MJ/m _n ³	7	9,2
		kcal/m _n ³	1.700	2.200
Elementi u tragovima	Čestice	g/m _n ³	0,003	0,007
	Katran		0,0001	0,0005
	HCl		0,1	0,9
	H ₂ S		0,1	0,6
	NH ₃		0,5	1,7

5.1.2. Sustav za čišćenje sintetskog plina

Nakon izlaska iz rasplinjača sintetski plin odlazi u sustav za čišćenje, budući se u plinskoj turbini i plinskom motoru ne može koristiti u stanju u kakvom izlazi iz rasplinjača. Tablica 5.3. prikazuje sastav i stanje pročišćenog sintetskog plina.

Katran se iz sintetskog plina odvaja metodom katalitičkog krekinga, a za tu svrhu se koristi vapnenac kao što je objašnjeno u poglavlju 4.2., dok se koncentracija katrana kontrolira ispirnim tornjevima. Prije prolaska sintetskog plina kroz vrećasti filter, sintetski plin je potrebno ohladiti na temperaturu oko 500 °C. U vrećastom filteru se uz odvajanje krutih čestica ujedno vrši odvajanje alkalnih metala.

5.1.3. Plinski motor

U osnovnom slučaju postrojenje će proizvoditi samo električnu energiju putem upotrebe plinskih motora. Kako bi se proračunala potrebna snaga motora koristit će se podaci iz tablica 5.1., 5.2. i 5.3.. Zbog mnogih pretpostavki koje su korištene u ovom proračunu, kao što je povećanje efikasnosti na temelju veličine i dr. u proračunu će se koristiti donje vrijednosti navedene u tim tablicama.

$$E_g = \frac{m_g \cdot H_{dg}}{3600} \quad [\text{MW}]$$

$$E_g = \frac{31.111 \cdot 4,5}{3600} = 38,89 \quad [\text{MW}]$$

E_g je energija koju sintetski plin posjeduje. Kako se u postrojenju nalaze dvije linije za proizvodnju sintetskog plina, energija je dvostruko veća i iznosi $E_g = 77,78$ [MW]. Iskoristivost današnjih velikih plinskih motora je oko 45 %, međutim, zbog izrazito niske donje ogrjevnice vrijednosti sintetskog plina i manje koncentracije metana nego što je to kod prirodnog plina, procijenjeno je da će se iskoristivost kretati oko 35 %, tako da će ukupna električna snaga na izlazu biti:

$$P_{el} = E_g \cdot \eta_{pm} \quad [\text{MW}]$$

$$P_{el} = 77,78 \cdot 0,33 = 25,67 \quad [\text{MW}].$$

Prilikom pregleda tržišta, stupljeno je u kontakt s velikom kompanijom za proizvodnju plinskih motora Wärtsilä iz Helsinkija [14]. Na temelju njihove ponude i preporuke, a s poznatom snagom motora, odlučeno je odabrati plinski motor tvorničkih oznaka 20V34SG. Tehničke karakteristike plinskog motora prikazane su u tablici 5.4.. Električna snaga iznosi 8.730 kW, te je zbog toga potrebno instalirati tri plinska motora, čija je električna snaga onda 26.190 kW, što zadovoljava proizvodnju električne energije postrojenja.

Tablica 5.4. Tehničke karakteristike plinskog motora [16]

Proizvođač	Wärtsila	
Model	20V34SG	
Električna snaga	kW	8.730
Električna iskoristivost	%	46,5*
Dimenzije		
Duljina	mm	12.890
Širina	mm	3.300
Visina	mm	4.243
Težina	t	132

* $Hd > 28 \text{ MJ/m}^3$, Metanski broj > 80 .

Iskoristivost postrojenja

Kada znamo sve elemente postrojenja pokazat ćemo proračun iskoristivosti takvog postrojenja. Iskoristivost postrojenja se računa kao omjer izlazne snage, odnosno proizvedene električne energije i ulazne kemijske energije sadržane u komunalnom otpadu. Ogrjevna vrijednost RDF-a je poznata iz tablice 5.1. i iznosi 15 MJ/kg, a količina energije koja ulazi u proces iznosi:

$$\dot{M}_{RDF} = \frac{\dot{m}_{RDF}}{3.600} \cdot n_R$$

$$\dot{M}_{RDF} = \frac{13.332}{3.600} \cdot 2 = 7,41 \quad [\text{kg/s}]$$

$$E_{RDF} = \dot{M}_{RDF} \cdot H_{dg} = 7,41 \cdot 15 = 111,15 \quad [\text{MW}]$$

Potrebno je količinu RDF-a koja ulazi u rasplinjač podijeliti s 3.600, kako bi dobili količinu u sekundama. Kao što je već navedeno u tablici 5.2., n je broj rasplinjača. Kada je poznata energija koja ulazi u proces, potrebno je izračunati neto proizvedenu električnu energiju. Plinski motori jesu razvili snagu od 25.67 MW, međutim dio te snage troši se za vlastitu potrošnju, u koju se ubrajaju sve pumpe i kompresori u postrojenju, zatim pužni vijci koji dopremaju RDF u rasplinjač i dr. Smatra se, da je

udio vlastite potrošnje u postrojenjima s plinskim motorima oko 13 % [1] proizvedene snage, stoga vlastita potrošnja analiziranog postrojenja iznosi:

$$P_{VP} = P_{el} \cdot 0,13 \quad [\text{MW}]$$

$$P_{VP} = 25,67 \cdot 0,13 = 3,36 \quad [\text{MW}]$$

Neto proizvedena električna snaga jednaka je:

$$P_{Nel} = P_{el} - P_{VP} \quad [\text{MW}]$$

$$P_{Nel} = 25,67 - 3,36 = 22,33 \quad [\text{MW}]$$

Sada kada se zna neto proizvedena električna snaga, kao i energetske tok koji ulazi u proces, moguće je izračunati iskoristivost postrojenja.

$$\eta_{PP} = \frac{P_{Nel}}{E_{RDF}}$$

$$\eta_{PP} = \frac{22,33}{111,15} = 0,201$$

što znači da iskoristivost analiziranog postrojenja s plinskim motorima iznosi 20,1 %. Takva iskoristivost postrojenja se poklapa s vrijednostima koje su navedene u tablici 3.1. poglavlja 3.3. Energetske značajke postupka rasplinjavanja.

5.1.4. Financijski plan

Nakon što je isplanirana sva potrebna oprema za odgovarajuće postrojenje, prikazati će se njegovi ekonomski parametri. Za ekonomski proračun potrebno je iskazati sve troškove i prihode postrojenja, plan otplate zajma, ekonomske parametre potrebne za

otplatu zajma i sl. Na kraju će se u tablici prikazati svi važni ekonomski segmenti kroz životni vijek postrojenja i izračunati cijenu koštanja zbrinjavanja otpada.

Troškovi

U troškove postrojenja se ubrajaju investicijski i pogonski troškovi. U tablici 5.5. prikazani su svi investicijski troškovi.

Tablica 5.5. Investicijski troškovi [6]

Prijamna hala i oprema	€	8.280.000
Rasplinjači (2 kom.)	€	55.800.000
Plinski motori (3 kom.)	€	36.000.000
Sustav za pročišćavanje plinova	€	15.660.000
Građevinski radovi	€	12.600.000
Projektiranje	€	4.950.000
Radovi kolaudacije	€	5.400.000
Ukupno	€	138.690.000

Tablica 5.6. Pogonski troškovi [6]

Koks	€	540.000
Vapnenac	€	126.000
Prirodni plin	€	153.000
Voda + tretman	€	720.000
Radna snaga	€	1.800.000
Održavanje	€	4.160.700
Osiguranje	€	1.386.900
Amortizacija	€	6.934.500
Kamata	€	11.095.200
Ostali troškovi	€	1.800.000
Ukupno	€	28.303.200

U tablici 5.6. prikazani su svi pogonski troškovi. Budući je ogrjevna vrijednost sintetskog plina niska, potrebno je imati u postrojenju prirodni plin za pokretanje samog postrojenja, ili održavanje procesa. Koks i vapnenac se koriste u sustavu čišćenja sintetskog plina, a naveden je i proces pripreme vode za korištenje u procesu. Nadalje je naveden trošak radne snage, što se odnosi na posadu postrojenja. Za

vođenje postrojenja kapaciteta do 200.000 t/god potrebno je imati zaposleno do 133 čovjeka koji rade na smjene [17]. U trošak održavanja ubrajaju se svi neplanirani popravci koji će eventualno biti potrebni. Održavanje se procjenjuje na 3 % vrijednosti ukupne investicije, dok se za izračunavanje osiguranja uzima se 1 % od ukupne investicije. U pogonske troškove ubrajaju se još amortizacija opreme, koja se računa kao ukupna investicija podijeljena na životni vijek postrojenja i kamata zajma. Svi neplanirani troškovi spadaju pod ostale troškove.

Prihodi

Republika Hrvatska još nije donijela posebnu poticajnu tarifu za električnu energiju proizvedenu iz komunalnog otpada, tako da će se pretpostaviti ona koja je definirana za skupinu „2g“, tj. za odlagališni plin, *Tarifnog sustava za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije* koji je donijela Vlada Republike Hrvatske („Narodne novine“, br. 33/2007) [18]. Ukoliko bi se koristio takav tarifni sustav, prodajna cijena električne energije bila bi 0,36 kn/kWh.

Već je navedeno da je maksimalna snaga jednaka $P_{Nel} = 22,33$ MW. Ukoliko postrojenje radi godišnje 7.500 sati, godišnje proizvedena električna energija iznosi:

$$E_{Nel} = P_{Nel} \cdot 7.500 \text{ MWh/god}$$

$$E_{Nel} = 22,33 \cdot 7.500 = 167.475 \text{ MWh/god}$$

Kada se cijena od 0,36 kn/kWh preračuna u €/MWh, prodajna cijena električne energije iznosi 48 €/MWh, te je prihod D jednak:

$$D = E_{Nel} \cdot 48 \text{ €/god}$$

$$D = 167.475 \cdot 48 = 8.038.800 \text{ €/god.}$$

Otplata zajma

Za pokrivanje investicije potrebno je podignuti zajam. U tablici 5.7. su navedeni glavni parametri zajma, iz kojih se onda izračunava iznos godišnje otplate zajma.

Tablica 5.7. Financijski uvjeti

Zajam	
Ukupno, €	138.690.000
Kamatna stopa, %	8
Otplata, godina	12
Amortizacija, godina	20
Diskontna stopa, %	5

Na temelju navedenih vrijednosti izračunava se iznos godišnje otplate zajma prema sljedećoj formuli:

$$R = \frac{k}{1 - \frac{1}{(1+k)^n}} \cdot G$$

gdje je:

R - iznos godišnje otplate zajma,

k - kamatna stopa,

G - ukupan iznos zajma,

n - godina otplate.

U tablici 5.8. prikazan je tok novca u određenim godinama. Zbog veličine tablice nisu prikazane sve godine životnog vijeka postrojenja, već one najvažnije u kojima se događa određena promjena. Tu je potrebno istaknuti nekoliko presudnih faktora koji su utjecali na rezultate proračuna:

- da je specifični trošak računat na razdoblje od 20 godina, koliko traje amortizacija opreme (životni vijek postrojenja),
- da je zajam podignut na razdoblje od 12 godina,
- da se u proračunu koristila diskontna stopa od 5 %,

- da se otkupna cijena električne energije nije mijenjala tokom 20 godina vijeka postrojenja, isto kao i osiguranje te troškovi održavanja.

Specifični trošak zbrinjavanja otpada analiziranim postrojenjem s plinskim motorom kao proizvođačem električne energije iznosi 44,85 € po toni otpada.

Tablica 5.8. Tok novca

Zajam										
Godina		1	2	3	6	9	12	13	16	20
Investicija, €	138.690.000,00									
Kamatna stopa	8%									
Godina otplate	12									
Glavnica, €/god		7.308.271,90	7.892.933,65	8.524.368,34	10.738.249,09	13.527.101,24	17.040.251,76			
Kamata, €/god		11.095.200,00	10.510.538,25	9.879.103,56	7.665.222,81	4.876.370,66	1.363.220,14			
Godišnja rata, €/god		18.403.471,90	18.403.471,90	18.403.471,90	18.403.471,90	18.403.471,90	18.403.471,90			
Prihod										
Prodaja el. Energije, €/MWh	48									
Proizvedena el. Energija, MW	22,33									
Proizvedena el. Energija, MWh/god		167.475,00	167.475,00	167.475,00	167.475,00	167.475,00	167.475,00	167.475,00	167.475,00	167.475,00
Ukupni prihod, €/god		8.038.800,00	8.038.800,00	8.038.800,00	8.038.800,00	8.038.800,00	8.038.800,00	8.038.800,00	8.038.800,00	8.038.800,00
Troškovi										
Vapnenac, €/god		126.000,00	126.000,00	126.000,00	126.000,00	126.000,00	126.000,00	126.000,00	126.000,00	126.000,00
Koks, €/god		540.000,00	540.000,00	540.000,00	540.000,00	540.000,00	540.000,00	540.000,00	540.000,00	540.000,00
Prirodni plin; €/god		153.000,00	153.000,00	153.000,00	153.000,00	153.000,00	153.000,00	153.000,00	153.000,00	153.000,00
Voda + tretman		720.000,00	720.000,00	720.000,00	720.000,00	720.000,00	720.000,00	720.000,00	720.000,00	720.000,00
Održavanje, €/god	3%	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00
Osiguranje, €/god	1%	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00
Radna snaga, €/god		1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00
Ostali poslovi, €/god	1%	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00
Amortizacija, €/god	20	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00
Kamata, €/god		11.095.200,00	10.510.538,25	9.879.103,56	7.665.222,81	4.876.370,66	1.363.220,14	0,00	0,00	0,00
Ukupni troškovi, €/god		28.303.200,00	27.718.538,25	27.087.103,56	24.873.222,81	22.084.370,66	18.571.220,14	17.208.000,00	17.208.000,00	17.208.000,00
Dobit										
Dobit, €/god		-20.264.400,00	-19.679.738,25	-19.048.303,56	-16.834.422,81	-14.045.570,66	-10.532.420,14	-9.169.200,00	-9.169.200,00	-9.169.200,00
Sadašnja vrijednost, €/god	5%	-19.299.428,57	-17.850.102,72	-16.454.640,80	-12.562.105,49	-9.053.900,08	-5.864.845,64	-4.862.622,53	-4.200.516,17	-3.455.775,05
Ukupna vrijednost, €	-179.400.772,17									
Specifičan trošak, €/t	44,85									

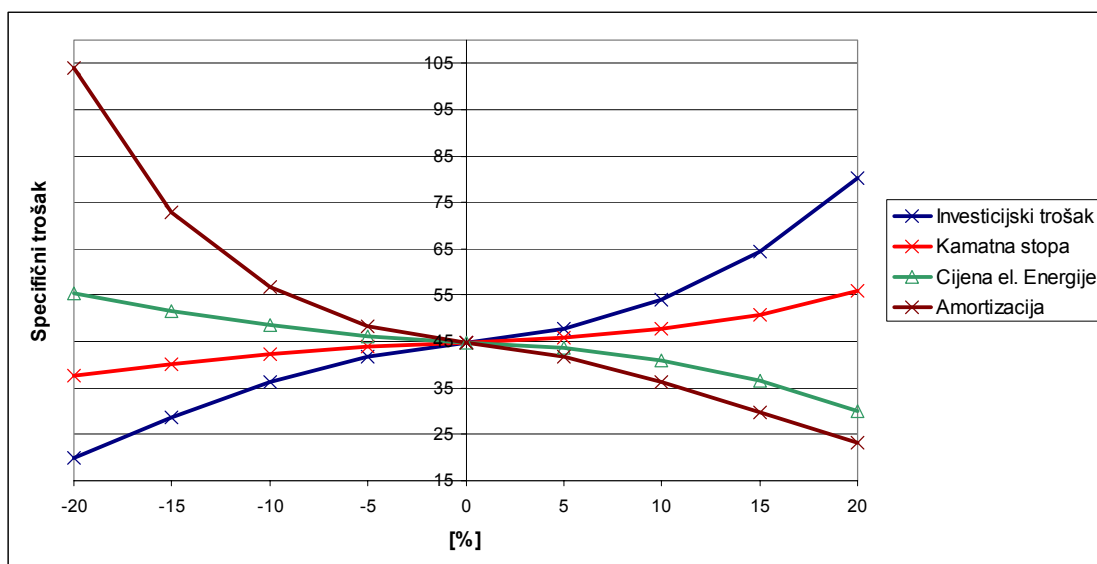
5.1.5. Analiza osjetljivosti

Pri proračunu postrojenja pretpostavljen je niz ulaznih parametara čije se vrijednosti nisu mogle sa sigurnošću odrediti. Vrijednosti parametara su odabrane na temelju svjetskih iskustava, ili određenih pretpostavki za koje se smatra da će vrijediti u budućnosti. Planiranje novih postrojenja, a pogotovo postrojenja koja koriste nove tehnologije koje još nisu ušle u široku primjenu, izrazito je težak. Zbog toga se projekt pokušava učiniti što elastičnijim (prilagodljivijim na promjene ulaznih parametara). U ovom poglavlju će se prikazati utjecaj određenih parametara na rezultate proračuna. Time se pokušava procijeniti utjecaj promjene vrijednosti ulaznih parametara koje se potencijalno mogu pojaviti u periodu između planiranja i izvedbe projekta.

U analizi osjetljivosti pokazat će se ovisnost specifičnog troška zbrinjavanja komunalnog otpada o sljedećim parametrima:

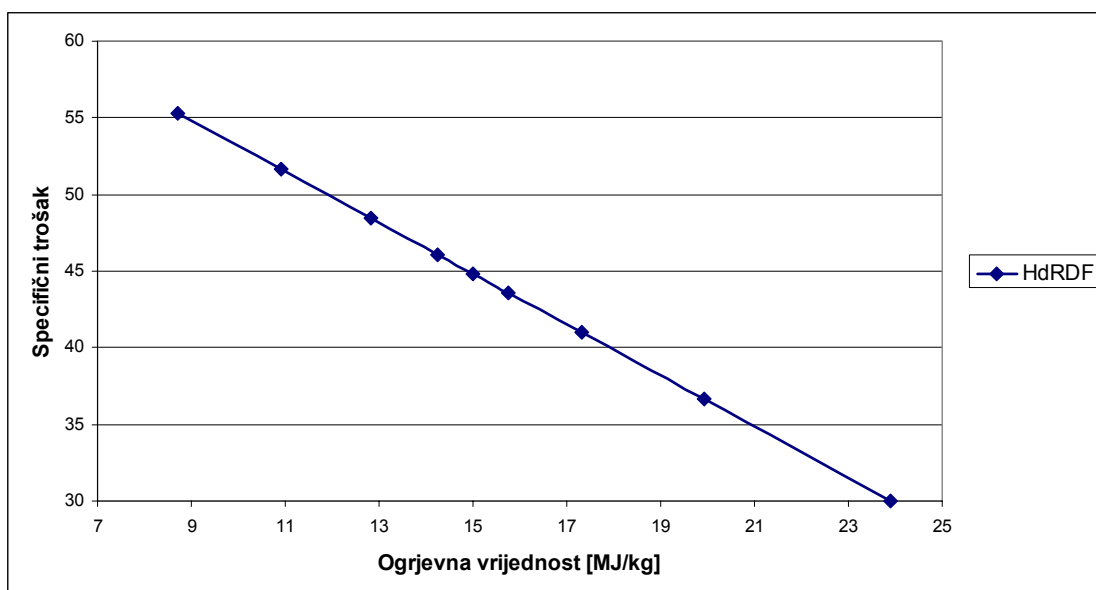
- investicijskom trošku,
- kamatnoj stopi,
- prodajnoj cijeni električne energije,
- amortizaciji opreme,
- ogrjevnoj vrijednosti RDF-a,
- iskoristivosti rasplinjača.

Proračunom je izračunato da će specifični trošak iznositi 44,85 € po toni zbrinutog otpada, te će se ta vrijednost uzeti kao referentna. Na slici 5.3. ta vrijednost se nalazi u točki sjecišta sve četiri krivulje. Za svaki od parametara određene su vrijednosti odmaknute za 5, 10, 15 i 20 % ispod i iznad referentne vrijednosti. Svaka krivulja prikazuje specifični trošak zbrinjavanja komunalnog otpada u zavisnosti od navedene promjene vrijednosti



Slika 5.3. Analiza osjetljivosti projekta u ovisnosti o različitim parametrima

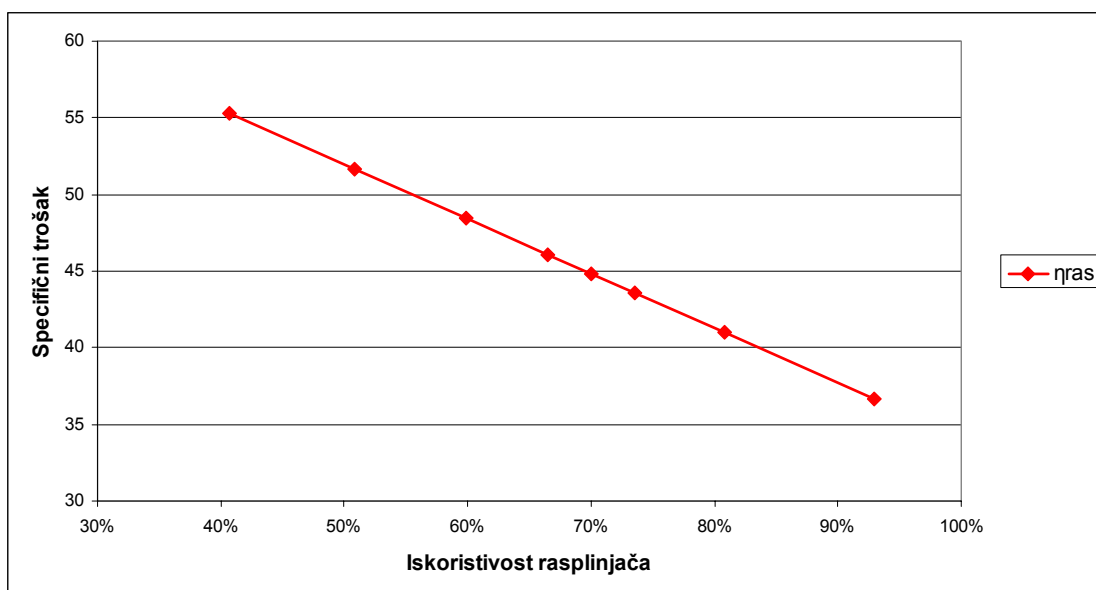
Uočljivo je da se krivulje investicijskog troška i kamatne stope identično mijenjaju, te je lako zaključiti da ukoliko se povećava investicijski trošak odnosno kamatna stopa, da će specifični trošak zbrinjavanja komunalnog otpada rasti. Suprotan trend pokazuju krivulje kretanja prodajne cijene električne energije i amortizacije opreme. Kako se povećava cijena otkupa električne energije tako opada specifični trošak zbrinjavanja otpada, što je rezultat veće dobiti. Isti trend pokazuje i krivulja kretanja trajanja amortizacije opreme. Što je dulja amortizacija, manji je specifični trošak. Jasno se vide dvije grupe parametara koje se razlikuju za određeni postotak. Prva grupa parametara je ona koja smanjuje specifični trošak zbrinjavanja otpada s porastom vrijednosti parametra, kao što su amortizacija i prodajna cijena električne energije, koje pogoduju investitorima. Na drugoj strani je grupa parametara čiji rast utječe ujedno i na rast specifičnog troška, što projekt čini rizičnim, kao što je investicijski trošak, kamatna stopa i dr.



Slika 5.4. Analiza osjetljivosti utjecaja ogrjevnosti RDF-a.

Uz količinu goriva (RDF), ogrjevna vrijednost je drugi najvažniji ulazni parametar koji određuje rad postrojenja. Slika 5.4. pokazuje analizu osjetljivosti utjecaja ogrjevnosti goriva, odnosno kretanje vrijednosti specifičnog troška zbrinjavanja otpada u ovisnosti o ogrjevnoj vrijednosti RDF-a koji se rasplinjava u postrojenju. Od velike važnosti za pravilan pogon postrojenja je što manja promjena ogrjevnosti RDF-a, budući da se postrojenje optimira za relativno usko područje ogrjevnosti. Međutim, ogrjevna vrijednost RDF-a ovisi o mnogo čimbenika, kao što su promjene kriterija gospodarenja otpadom, navike stanovništva, postotak recikliranja otpada itd.

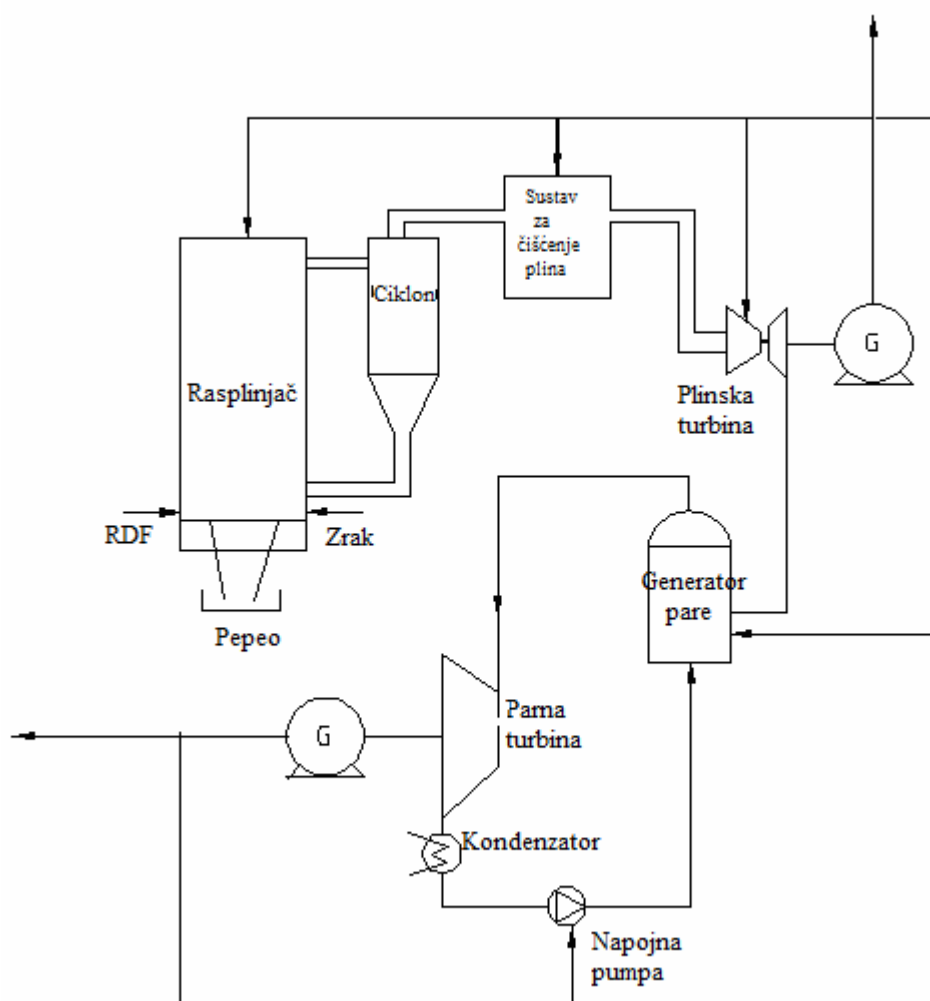
Rasplinjač je dio opreme koji također pokazuje tendenciju razvoja. Rasplinjavanje u fluidiziranom sloju je novija tehnologija, koja se koristi zadnja dva desetljeća, te će se uz porast broja takvih rasplinjača poboljšati i unaprijediti njihov rad. U ovome radu je korišten rasplinjač s iskoristivosti od 70 %, što predstavlja donju vrijednost iskoristivosti u odnosu na druge rasplinjače. Ukoliko se ta vrijednost poboljša, što se očekuje, doći će do smanjenja specifičnog troška zbrinjavanja otpada, jer će se moći iskoristiti više energije iz otpada. Slika 5.5. pokazuje analizu osjetljivosti iskoristivosti rasplinjača s fluidiziranim slojem iz koje se jasno vidi smanjenje specifičnog troška s povećanjem iskoristivosti rasplinjača.



Slika 5.5. Analiza osjetljivosti utjecaja kretanja iskoristivosti rasplinjača

5.2. Usporedba plinskog i kombiniranog postrojenja

Kombinirano (kombi) postrojenje nosi engleski naziv. *CCGT*, što znači *Combined Cycle Gas Turbine*. Kao što je objašnjeno u poglavlju 4.3. radi se o postrojenju za proizvodnju električne energije, koje predstavlja kombinaciju plinske i parne turbine. Ono predstavlja najmoderniji i najbolji način dobivanja električne energije, uz najviši stupanj iskoristivosti. Ukupna iskoristivost se kreće od 26 % do 35 %, kao što prikazuje tablica 3.1.



Slika 5.6. Shema kombiniranog postrojenja

Prvo će se opisati elementi kombiniranog postrojenja. Rasplinjač ostaje isti kao i kod postrojenja u kojem se električna energija dobivala plinskim motorom. Zbrinjava se jednaka količina RDF-a, te su dvije linije rasplinjavanja i karakteristike rasplinjača jednake. Tablica 4.2. prikazuje zahtjeve kvalitete sintetskog plina za korištenje u plinskom motoru i plinskoj turbini, tako da će i sustav za pročišćavanje sintetskog plina ostati isti, budući da zadovoljava iste zahtjeve.

Nakon što je proizveden i očišćen sintetski plin više ne odlazi u plinski motor na izgaranje, već u plinsku turbinu. Nakon prolaska kroz plinsku turbinu dimni plinovi odlaze u kotao na otpadnu toplinu, gdje se hlađenjem dimnih plinova proizvodi para . Para ekspandira u parnoj turbini, a ohlađeni dimni plinovi odlaze na završno čišćenje prije ispuštanja u atmosferu putem dimnjaka.

Radi preglednosti će se ponoviti najvažniji parametri rasplinjača, te prikazati proračun potrebnog kombiniranog postrojenja.

Tablica 5.9. Parametri rasplinjača

Broj rasplinjača	n_R	2	
Tip rasplinjača		Cirkulirajući fluidizirani sloj	
Toplinski kapacitet		MW	55,56
Temperatura procesa		°C	850
Kapacitet RDF-a	\dot{m}_{RDF}	kg/h	13.320
Proizvodnja sintetskog plina	\dot{m}_g	m_n^3/h	31.111
Iskoristivost rasplinjača	η_R	%	70

5.2.1. Kombinirana postrojenje

Budući da su rasplinjači u oba postrojenja jednaki, i količina dobivenog sintetskog plina će biti jednaka: Kako su formule za proračun pojedinih veličina jednake kao i u slučaju postrojenja s plinskim motorom, prikazat će se samo zadnji koraci proračuna.

$$E_g = 2 \cdot \frac{31.111 \cdot 4,5}{3600} = 77,78 \quad [\text{MW}]$$

Iskoristivost današnjih najboljih kombiniranih postrojenja doseže vrijednost čak i do 60 %, Međutim, kao i kod plinskih motora, veliki stupanj iskoristivosti se postiže gorivima velike ogrjevne moći. Dobiveni sintetski plin ima izrazito nisku donju ogrjevnu vrijednost od samo 4,5 MJ/ m_n^3 , pa će i iskoristivost postrojenja biti osjetno manja. Procijenjeno je da će se iskoristivost kretati oko 45 %, tako da će ukupna električna snaga na izlazu biti:

$$P_{el2} = 77,78 \cdot 0,45 = 35,00 \quad [\text{MW}].$$

Iskoristivost kombiniranog postrojenja

Kao i kod postrojenja s plinskim motorom, iskoristivost postrojenja se računa kao omjer izlazne snage, odnosno proizvedene električne energije i ulazne kemijske energije sadržane u otpadu. Ogrjevna vrijednost RDF-a je poznata iz tablice 5.9. i iznosi 15 MJ/kg a količina energije koja ulazi u proces iznosi:

$$E_{RDF} = \dot{M}_{RDF} \cdot H_{dg} = 7,41 \cdot 15 = 111,15 \quad [\text{MW}]$$

Kada je poznata energija koja ulazi u proces, potrebno je izračunati neto proizvedenu električnu energiju. Već je objašnjeno, da u takvim postrojenjima postoji vlastita potrošnja, pa će se tako dio od proizvedene snage koja je dobivena u kombiniranom postrojenju biti utrošena na sam rad postrojenja. Vlastita potrošnja kombiniranog postrojenja nešto je veća nego što je to slučaj s postrojenjem koje se koristi plinskim motorom, zbog većeg broja potrošača (pumpi, kompresora, ventilatora itd.), te se kreće oko 15 % [1] proizvedene snage. Vlastita potrošnja analiziranog postrojenja iznosi:

$$P_{VP2} = 35,00 \cdot 0,15 = 5,25 \quad [\text{MW}]$$

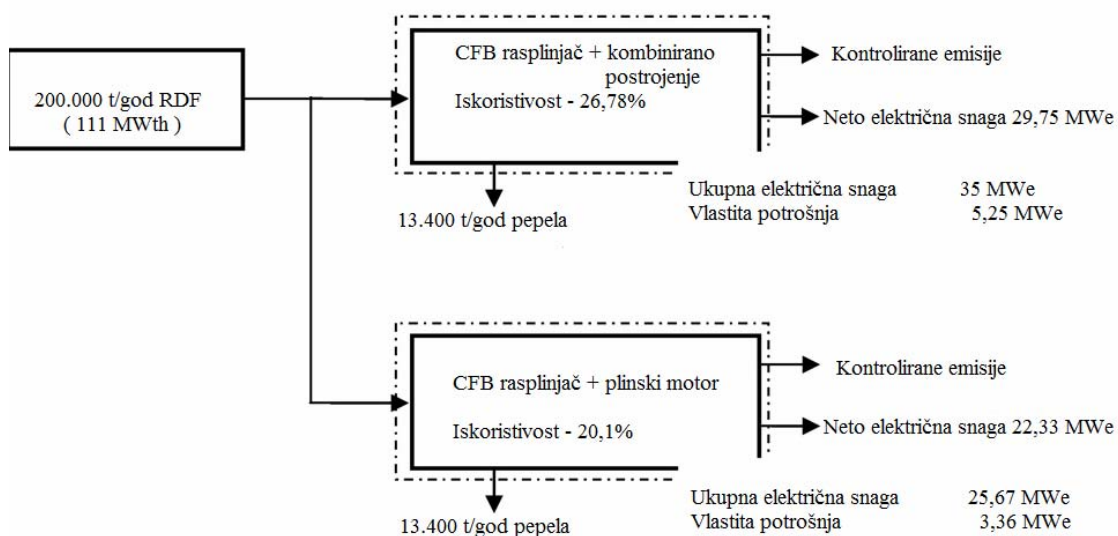
Neto proizvedena električna jednaka je:

$$P_{Nel2} = 35,00 - 5,25 = 29,75 \quad [\text{MW}]$$

Sada kada je poznata neto proizvedena električna snaga, kao i energetska tok koji ulazi u proces, moguće je izračunati iskoristivost postrojenja:

$$\eta_{KP} = \frac{29,75}{111,15} = 0,268$$

što znači da iskoristivost analiziranog postrojenja iznosi 26,8 %. Isto kao i kod postrojenja s plinskim motorima ovako izračunata iskoristivost postrojenja poklapa se s vrijednostima koje su navedene u tablici 3.1. poglavlja 3.3.



Slika 5.7. Usporedba analiziranih varijanti postrojenja

5.2.2. Financijska usporedba

Dvije su ključne razlike između ove dvije varijante analiziranog postrojenja. Prva se odnosi na veću proizvodnju električne energije kombiniranog postrojenja, zbog čega se povećavaju prihodi postrojenja, a druga na niži investicijski trošak, što također doprinosi isplativosti investicije. Prednost plinskog motora se očituje u većoj pouzdanosti i raspoloživosti.

Prihodi

Zbog veće iskoristivosti kombiniranog postrojenja, iz iste količine RDF-a proizvodi se više električne energije. Razlika iznosi:

$$\Delta P_{Nel} = P_{Nel2} - P_{Nel} = 29,75 - 22,33 = 7,42 \quad [\text{MW}]$$

Za razliku od analiziranog postrojenja koje koristi plinski motor za proizvodnju električne energije, računat će se da kombinirano postrojenje radi 6.500 sati godišnje. Ta pretpostavka se uvodi zbog manje pouzdanosti i raspoloživosti kombiniranog postrojenja. Prodajna cijena električne energije ostaje ista, te iznosi 48 €/MWh, pa je razlika prihoda:

$$D = 22,33 \cdot 7.500 \cdot 48 = 8.038.800 \quad [\text{€/god.}]$$

$$D_2 = 29,75 \cdot 6.500 \cdot 48 = 9.282.000 \quad [\text{€/god.}]$$

$$\Delta D = D_2 - D = 1.243.200 \quad [\text{€/god}]$$

Investicijski troškovi

Kao što je navedeno na početku ovog poglavlja, druga razlika uspoređenih postrojenja je manji investicijski trošak kombiniranog postrojenja. Budući da je većina elemenata postrojenja identična onima iz postrojenja s plinskim motorom, svi troškovi osim postrojenja za proizvodnju električne energije, ostat će isti.

Cijena investicije klasičnog kombiniranog postrojenja kreće se oko 900 €/kW, međutim u ovom slučaju, isto kao i kod plinskih motora, zbog izrazito niske ogrjevne vrijednosti, biti će potrebne modifikacije. Te modifikacije odnose se na plinsku turbinu, pa će tako procijenjeni trošak investicije porasti za 100 €/kW, na konačnih 1.000 €/kW. CCGT postrojenje proizvodi 35 MW, pa tako ukupna investicija u postrojenje za proizvodnju električne energije iznosi 35.000.000 €. Kada je poznata cijena postrojenja za proizvodnju električne energije poznata je i ukupna investicija postrojenja koja iznosi 137.690.000 €.

Kada su poznati svi tehnički i financijski parametri, u tablici 5.10. prikazat će se tok novca ovako konstruiranog postrojenja. Isto kao i kod analize postrojenja s plinskim motorom potrebno je istaknuti nekoliko presudnih faktora koji su utjecali na rezultate proračuna:

- da je specifični trošak računat na razdoblje od 20 godina, koliko traje amortizacija opreme (životni vijek postrojenja),
- da je zajam podignut na razdoblje od 12 godina,
- da se u proračunu koristila diskontna stopa od 5 %,

- da se otkupna cijena električne energije nije mijenjala tokom 20 godina vijeka postrojenja, isto kao i osiguranje te troškovi održavanja.

Specifični trošak zbrinjavanja otpada kombiniranog postrojenja iznosi 38,62 € po toni zbrinutog otpada.

Tablica 5.10. Tok novca kombiniranog postrojenja

Zajam										
Godina		1	2	3	6	9	12	13	16	20
Investicija, €	137.690.000,00									
Kamatna stopa	8%									
Godina otplate	12									
Glavnica, €/god		7.255.576,88	7.836.023,03	8.462.904,87	10.660.822,82	13.429.566,44	16.917.386,00			
Kamata, €/god		11.015.200,00	10.434.753,85	9.807.872,01	7.609.954,06	4.841.210,44	1.353.390,88			
Godišnja rata, €/god		18.270.776,88	18.270.776,88	18.270.776,88	18.270.776,88	18.270.776,88	18.270.776,88			
Prihod										
Prodaja el. Energije, €/MWh	48									
Proizvedena el. Energija, MW	29,75									
Proizvedena el. Energija, MWh/god		193.375,00	193.375,00	193.375,00	193.375,00	193.375,00	193.375,00	193.375,00	193.375,00	193.375,00
Ukupni prihod, €/god		9.282.000,00	9.282.000,00	9.282.000,00	9.282.000,00	9.282.000,00	9.282.000,00	9.282.000,00	9.282.000,00	9.282.000,00
Troškovi										
Vapnenac, €/god		126.000,00	126.000,00	126.000,00	126.000,00	126.000,00	126.000,00	126.000,00	126.000,00	126.000,00
Koks, €/god		540.000,00	540.000,00	540.000,00	540.000,00	540.000,00	540.000,00	540.000,00	540.000,00	540.000,00
Prirodni plin; €/god		153.000,00	153.000,00	153.000,00	153.000,00	153.000,00	153.000,00	153.000,00	153.000,00	153.000,00
Održavanje, €/god	3%	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00	4.160.700,00
Osiguranje, €/god	1%	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00
Radna snaga, €/god		1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00
Ostali poslovi, €/god	1%	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00	1.386.900,00
Amortizacija, €/god	20	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00	6.934.500,00
Kamata, €/god		11.015.200,00	10.434.753,85	9.807.872,01	7.609.954,06	4.841.210,44	1.353.390,88	0,00	0,00	0,00
Ukupni troškovi, €/god		27.503.200,00	26.922.753,85	26.295.872,01	24.097.954,06	21.329.210,44	17.841.390,88	16.488.000,00	16.488.000,00	16.488.000,00
Dobit										
Dobit, €/god		-18.221.200,00	-17.640.753,85	-17.013.872,01	-14.815.954,06	-12.047.210,44	-8.559.390,88	-7.206.000,00	-7.206.000,00	-7.206.000,00
Sadašnja vrijednost, €/god	5%	-17.353.523,81	-16.000.683,76	-14.697.222,34	-11.055.893,03	-7.765.739,26	-4.766.189,12	-3.821.495,65	-3.301.151,63	-2.715.865,61
Ukupna vrijednost, €	-154.465.335,95									
Specifičan trošak, €/t	38,62									

6. ZAKLJUČAK

Odlaganje otpada na odlagalištu pokazuje se kao najlošija mogućnost zbrinjavanja otpada i sukladno zakonodavstvu EU treba očekivati potpunu zabranu odlaganja biorazgradivog otpada.

Principi gospodarenja otpadom trebaju se temeljiti na hijerarhijskom konceptu: izbjegavanje–vrednovanje (oporaba)–odlaganje. Termička obrada otpada s oporabom energije predstavlja zadnju stepenicu u sustavu cjelovitog gospodarenja otpadom. Odlagati se mogu samo oni dijelovi otpada koji su prošli mehaničko-biološku ili termičku obradu i ne mogu se iskoristiti u druge svrhe.

U radu su ukratko opisane glavne tehnologije zbrinjavanja otpada, uz detaljnu razradu tehnologije rasplinjavanja. Objašnjeni su mnogi aspekti utjecaja te tehnologije na okoliš, kao i međunarodna iskustva u dosadašnjem korištenju. Prikazana su različita postrojenja za rasplinjavanje otpada i proizvodnju električne energije te sustavi za pročišćavanje sintetskog plina.

Napravljen je tehno-ekonomski proračun isplativosti postrojenja s plinskim motorom kao proizvođačem električne energije. Kao ogledni primjer za analizu planiranog postrojenja uzeto je postojeće postrojenje u mjestu Greve in Chianti, blizu Firence. Analizirano postrojenje se sastoji od dvaju rasplinjača s cirkulirajućim fluidiziranim slojem, kapaciteta 100.000 tona RDF-a svaki. Odabrana je navedena tehnologija rasplinjavanja, jer se pokazuje kao najbolja moguća u ovome trenutku razvoja (ujedno i najviše obećava). Kao i oprema za rasplinjavanje, sustav čišćenja sintetskog plina je također organiziran kao u postrojenju u Italiji. Na temelju izračunate potrebne snage i na temelju preporuke djelatnika tvrtke Wärtsilä iz Helsinkya, odabrani su plinski motori odgovarajuće snage. Procijenjeni su troškovi takvog postrojenja, te je prikazan tok novca kroz životni vijek postrojenja. Izračunato je, da je specifični trošak zbrinjavanje otpada u takvom postrojenju 44,85 €/t. Zbog niza pretpostavki i nepoznavanja točne metodologije konstruiranja takvog postrojenja, napravljena je

analiza osjetljivosti, kako bi se tehno-ekonomska analiza projekta učinila što elastičnijom.

Na kraju je napravljena usporedba analiziranog postrojenja s modernijim i naprednijim kombiniranim postrojenjem. Specifični trošak zbrinjavanja otpada analiziranim kombiniranim postrojenjem iznosi 38,62 €/t, te se pokazalo da je to isplativija varijanta. Valja naglasiti da je tehno-ekonomski proračun izrađen na temelju pretpostavki koji bitno određuju dobivene rezultate i da bi za konačnu prosudbu bio potreban još detaljniji proračun s točnijim ulaznim podacima. Naime, u slučaju kombiniranog postrojenja zahtjeva se najviši stupanj pročišćavanja sintetskog plina koji još uvijek nije u potpunosti dostignut, tako da se točna raspoloživost i pouzdanost kombiniranog postrojenja ne mogu sa sigurnošću tvrditi.

Literatura

- [1] Yassin L., Lettieri P., Simons S., Germana A., Techno-economic performance of energy-from-waste fluidized bed combustion and gasification processes in the UK context, Chemical Engineering Journal, 2007.
- [2] Dublin, Waste to energy,
<http://www.dublinwastetoenergy.ie/uploads/images/graph-municipal-waste.gif>
- [3] Okoliš, glasilo Ministarstva zaštite okoliša prostornog uređenja i graditeljstva,
<http://okolis.mzopu.hr/default.asp?ID=136>
- [4] Kučar Dragičević S., Butuči J., Kufrin J., Zbrinjavanje otpada u Republici Hrvatskoj - postojeće stanje, Agencija za zaštitu okoliša, 2006.
- [5] Agencija za zaštitu okoliša, Katastar otpada - Izvješće za 2006, Komunalni otpad,
<http://www.azo.hr/IZVJESCAIPREGLEDI>
- [6] Bogdan Ž., Schneider D., Dobrović S., Miličić J., Analiza tehnologija za energetske iskorištavanje krutog komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj, FSB, Zagreb, 2009.
- [7] Bošnjaković F., Nauka o toplini, I dio, (IV izdanje), Tehnička Knjiga, Zagreb, 1970.
- [8] Dimnjašević M., Polović V., Kozina M., Rasplinjavanje biomase, FSB, Zagreb, 2009.
- [9] Bošnjaković F., Nauka o toplini, III dio, RO Tehnička knjiga, Zagreb, 1986.
- [10] Belgiorno V., De Feo G., et al, Energy from gasification of solid wastes, Waste management, Pergamon press, 2002.
- [11] Granatstein D., Case study on waste-fuelled gasification project Greve in Chianti, Italy, IEA Bioenergy agreement, 2003.

[12] Morris M., Waldheim L., Energy recovery from solid waste fuels using advanced gasification technology, Waste management, Pergamon press, 1998.

[13] Bošnjaković F., Rasplinjavanje i čađenje Teorija generatorskih procesa, Izdanje nakladnog zavoda Hrvatske, 1947.

[14] Wärtsila Helsinki, <http://www.wartsila.com/>, 2009.

[15] Barducci G., The RDF gasifier of the florentine area (Greve – in – Chianti, Italy), The First Italian-Brazilian Symposium On Sanitary And Environmental Engineering , Santa Catarina, 2008.

[16] Wärtsila Helsinki,
<http://www.wartsila.com/en/productsservices,0,product,700D0188-3398-4A74-BCD5-4C398A51542C,B7F65DE7-F230-493F-9429-3F839A51D4F6,,.htm>

[17] Stubenvoll J., Böhmer S., Szednyj I., State of the Art for Waste Incineration Plants, Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management, Wien, 2002.

[18] http://www.hrote.hr/hrote/obnovljivi/OIE_vece_od_1_MW.pdf